



**Escola Politècnica Superior  
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# **TRABAJO FINAL DE GRADO**

**TÍTULO: Apocalipsis Zombi: Comparación con la propagación de una enfermedad infecciosa (II)**

**AUTOR: FLORES ROSALES, EDSON**

**FECHA DE PRESENTACIÓN: Junio, 2019.**

**APELLIDOS:** Flores Rosales

**NOMBRE:** Edson

**TITULACIÓN:** GRADO EN INFORMÁTICA

**PLAN:** FIS – DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**DIRECTOR:** MORENO LUPIAÑEZ, MANUEL

**DEPARTAMENT:** FIS – DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**CALIFICACIÓN DEL TFG**

**TRIBUNAL**

**PRESIDENTE**

LEBRATO GONZÁLEZ, ALEXANDER

**SECRETARIO**

SOLER RUIZ, JUAN

**VOCAL**

GARCÍA ALMIÑANA, JORDI

**FECHA DE LECTURA:** Julio, 2019

**Este Proyecto tiene en cuenta aspectos medioambientales:** No

## RESUMEN

Este trabajo es la continuación del presentado por Adrià Molina en 2017 [26], donde toma como base algunos modelos matemáticos y sus ecuaciones diferenciales que describen la propagación de enfermedades infecciosas reales y de ficción (zombis). Aquí se vuelven a analizar con más profundidad y mejoramos en el presente.

Estos modelos, parten del modelo SIR (Susceptible, Infectado, Retirado) básico [2], basado en la propagación de una posible epidemia Zombi, por lo que este trabajo respecta tratamos de analizar una epidemia real como es la Poliomielitis con estos modelos y observar los resultados que obtenemos con los que se obtuvieron en el pasado (reales).

También proponemos algunas mejoras para estos modelos y analizamos sus respectivos resultados en diferentes casos, a la vez que analizamos otros modelos presentados en diferentes artículos que también tratan una posible epidemia Zombi.

El trabajo avanza a hacia otro campo, el campo computacional, donde aprovechamos la capacidad de cálculo de un ordenados para realizar simulaciones de una posible epidemia Zombi y comparamos los resultados obtenidos del simulador con los anteriormente obtenidos con las ecuaciones diferenciales. Para ello usamos ABM (Agent Based Modelling), que usa Agentes Inteligentes o Vivos para realizar modelización de comportamientos desde una simulación computacional.

Para concluir analizamos y comparamos algunos de los resultados obtenidos en el trabajo precedente [26], con los obtenidos con el simulador, tanto en películas como en una posible infección en el estado español.

### Palabras clave:

Zombi	Modelo SIR	Enfermedad infecciosa	Agentes Vivos
Tabla IBP	Agent Based Modelling	Poliomielitis	Simulación
Interacción Humano-Zombie	Demografía		

## ABSTRACT

This work is the continuation of the one presented by Adrià Molina in 2017 [26], where it takes as a basis some mathematical models and their differential equations that describe the spread of real infectious diseases and fiction (zombies). Here they are analyzed again in more depth and we improve in the present.

These models are based on the SIR (Susceptible, Infected, Retired) basic model [2], based on the propagation of a possible Zombie epidemic, so this work is about trying to analyze a real epidemic such as Poliomyelitis with these models and observe the results that we obtain with those that were obtained in the past (real).

We also propose some improvements for these models and analyze their respective results in different cases, while analyzing other models presented in different articles that also deal with a possible Zombie epidemic. The work advances to another field, the computational field, where we take advantage of the calculation capacity of an orderly to perform simulations of a possible Zombie epidemic and compare the results obtained from the simulator with those previously obtained with differential equations.

For this we use ABM (Agent Based Modeling), which uses Intelligent or Living Agents to perform behavioral modeling from a computational simulation.

To conclude, we analyzed and compared some of the results obtained in the previous work [26], with those obtained with the simulator, both in films and in a possible infection in the Spanish state.

### Keywords:

Zombie	SIR Model	Infectious disease	Autonomous Agents
IBP Table	Agent Based Modelling	Poliomyelitis	Simulation
Interaction Human-Zombie	Demography		

## SUMARIO

1.1	MODELO SIR.....	13
1.1.2	MODELO SIR BÁSICO .....	13
1.1.3	MODELO SIR APLICADO A UNA EPIDEMIA ZOMBI .....	15
1.1.3	MODELO SIR APLICADO A UNA EPIDEMIA ZOMBI EN SUBPOBLACIONES SEPARADAS.....	16
1.1.4	MEJORAS AL MODELO DE SUBPOBLACIONES .....	18
2.1	MODELO BÁSICO .....	22
2.2	MODELO CON PERIODO DE INCUBACIÓN .....	25
2.3	MODELO DE CUARENTENA.....	28
2.4	MODELO CON CURA .....	31
2.5	MODELO DE ERRADICACIÓN IMPULSIVA.....	33
2.6	CRÍTICA GENERAL A LOS MODELOS .....	35
3.1	MODELO BÁSICO DE MUNZ.....	36
3.2	MODELO CON PERIODO DE INCUBACIÓN .....	37
3.4	MODELO CON CUARENTENA .....	39
3.5	MODELO CON CURA .....	41
3.6	MODELO DE ERRADICACIÓN IMPULSIVA.....	42
3.7	CONCLUSIONES .....	44
4.1	MODELO PARA LA INTERACCIÓN HUMANO-ZOMBI .....	46
4.2	CONCLUSIONES DEL MODELO MEJORADO .....	51
4.2.1	CONCLUSIONES DEL AUTOR .....	51
4.2.2	CONCLUSIONES PROPIAS, CRÍTICAS Y POSIBLES MEJORAS .....	52
4.2.3	APLICACIÓN DE LA MEJORA DEL NUEVO MODELO EN POBLACIONES.....	52
4.2.3.1	APLICACIÓN DE LA MEJORA DEL NUEVO MODELO EN LA POBLACIÓN ESPAÑOLA.....	53
4.2.3.2	APLICACIÓN DE LA MEJORA DEL NUEVO MODELO EN LA POBLACIÓN DE ESTADOS UNIDOS....	62
4.2.3.3	APLICACIÓN DE LA MEJORA EN LA POBLACIÓN DE ISLANDIA .....	68
4.2.3.4	CONCLUSIONES .....	73
5.1	METODOLOGIAS DE MODELIZACIÓN.....	75
6.1	AGENTE INTELIGENTE O VIVO .....	78

6.2 PROCESOS DE MODELADO .....	78
6.2 TRABAJAR MODELOS BASADOS EN AGENTES VIVOS .....	81
6.3 MODELO BASADO EN AGENTES VIVOS.....	81
6.3.1 SUGARESCAPE .....	81
6.3.4 NETLOGO .....	82
6.4 APLICANDO ABM EN LA “ZOMBIFICACIÓN” .....	83
6.4.1 METODOLOGIA .....	84
6.4.2 APROXIMACIÓN MODELO SUGARESCAPE .....	84
6.4.3 CIUDAD ZOMBI .....	86
6.4.3.1 MODELANDO CIUDAD ZOMBI .....	87
6.5 IMPLEMENTACION MODELO AGENTE ZOMBI .....	89
6.5.1 DISEÑO EN NETLOGO .....	89
6.5.2 SIMULACIONES NETLOGO .....	90
6.5.3 SIMULACIONES NETLOGO-FILMOGRAFÍA .....	105
4.5.4 CONCLUSIONES .....	120
HEATBUGS .....	127
BOIDS .....	127
MOUSETRAPS .....	129
SANTA FE ARTIFICIAL MARKET .....	130
-IMPLEMENTACIONES ABM .....	131
SWARM .....	131
MASON .....	133
REPAST .....	133
ASCAPE .....	134
CÓDIGO SIMULADOR .....	136
MANUAL DE USUARIO SIMULADOR.....	141

## SUMARIO DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Simulación de Modelo SIR aplicado a una epidemia Zombi [2]	p.7
<b>Figura 1.2</b> Simulación modelo SIR aplicado en una epidemia Zombi con Subpoblaciones Separadas.	p.17
<b>Figura 2.1</b> Muestra la transición de un individuo susceptible (S) a los otros grupos: infectado o zombi (Z) y retirado (R).	p.23
<b>Figura 2.2</b> Captura del gráfico del artículo [1], donde representa el modelo SZR.	p.25
<b>Figura 2.3</b> Muestra la transición de un individuo susceptible (S) a los otros grupos: infectado (I), zombi (Z) y retirado (R).	p.27
<b>Figura 2.4</b> Captura del gráfico del artículo [1], donde representa el modelo SIZR.	
<b>Figura 2.5</b> Muestra la transición de un individuo susceptible (S) a los otros grupos: infectado (I), zombi (Z), retirado (R) e individuos en cuarentena (Q).	p.29
<b>Figura 2.6</b> Captura del gráfico del artículo [1], donde representa el modelo SIZRQ.	p.30
<b>Figura 2.7</b> Muestra la transición de un individuo susceptible (S) a los otros grupos: infectado (I), zombi (Z) y retirado (R).	p.32
<b>Figura 2.8</b> Captura del gráfico del artículo [1], donde representa el modelo SZRQ.	p.33
<b>Figura 2.9</b> Captura del gráfico del artículo [1], donde representa el modelo de Erradicación Impulsiva.	p.34
<b>Figura 3.1</b> Modelo Básico de Munz aplicado en Canadá en 1933 durante la epidemia de la Polio, según datos de [4].	p.36
<b>Figura 3.2</b> Evolución de la polio en Canadá en 1933.	p.37
<b>Figura 3.3</b> Modelo de Munz con periodo Incubación adaptado a la epidemia de Polio en Canadá en 1933.	p.38
<b>Figura 3.4</b> Modelo de Munz con Cuarentena adaptado a la epidemia de Polio en Canadá.	
<b>Figura 3.5</b> Modelo de Munz con Cura adaptado a la epidemia de Polio en Canadá.	p.40
<b>Figura 4.1</b> Fase inicial del modelo con $\beta = 0.03$ .	p.48
<b>Figura 4.2</b> Fase inicial del modelo con $\beta = 0.0625$ .	p.48
<b>Figura 4.3</b> Fase de Histeria del modelo, la mayor parte de individuos son Zombis.	p.49
<b>Figura 4.4</b> Fase de contrata ataque del modelo, se observa una disminución de los Zombis.	p.50
<b>Figura 4.5</b> Fase de Contra ataque, iniciada más pronto, la propagación de los Zombis es baja.	p.51
<b>Figura 4.6</b> Grafica Fase Inicial mejorada en España.	p.57
<b>Figura 4.7</b> Grafica Fase Histeria mejorada en España.	p.58
<b>Figura 4.8</b> Grafica Fase Contra Ataque mejorada en España.	p.60
<b>Figura 4.9</b> Grafica Fase Contra Ataque, iniciada más pronto mejorada en España.	p.60
<b>Figura 4.10</b> Grafica Evolución Zombi Real en España.	p.61

<b>Figura 4.11</b> Gráfico Fase Inicial mejorada en Estados Unidos.	p.65
<b>Figura 4.12</b> Gráfico Fase Histeria mejorada en Estados Unidos.	p.66
<b>Figura 4.13</b> Gráfico Fase Contra Ataque mejorada Estados Unidos.	p.67
<b>Figura 4.14</b> Gráfico Fase Contra Ataque, iniciado más pronto en Estados Unidos.	p.67
<b>Figura 4.15</b> Grafico Fase Inicial mejorada en Islandia.	p.70
<b>Figura 4.16</b> Gráfico Fase Histeria Mejorada en Islandia.	p.71
<b>Figura 4.17</b> Fase de Contrata Ataque mejorada en Islandia.	p.72
<b>Figura 4.18</b> Fase Contra Ataque mejorada, iniciada más pronto en Islandia.	p.72
<b>Figura 5.1</b> Efecto sobre un Agente del exterior.	p.74
<b>Figura 6.1</b> Esquema de un sistema Real, basado en agente vivos.	p.76
<b>Figura 6.2</b> Ejemplo de simulación con Agentes Vivos en un Sistema Real.	p.77
<b>Figura 6.3</b> Esquema de Modelización con Agentes Vivos.	p.79
<b>Figura 6.4</b> Esquema de influencia de ambiente en un Sistema Real.	p.80
<b>Figura 6.5</b> Interacción de un Agente Vivo en un Ecosistema.	p.81
<b>Figura 6.6</b> Simulación con Agentes Vivos usando SugarScape.	p.82
<b>Figura 6.7</b> Simulación con Agentes Vivos en Netlogo.	p.83
<b>Figura 6.8</b> Esquema de aproximación a modelo Sugarescape.	p.84
<b>Figura 6.9</b> Esquema modelo ciudad Zombi.	p.85
<b>Figura 6.10</b> Representación sociedad Zombi.	p.86
<b>Figura 6.11</b> Modelo SZR.	p.87
<b>Figura 6.12</b> Modelo de Agente Zombi.	p.89
<b>Figura 6.13</b> Entorno de pruebas NetLogo (simulador).	p.90
<b>Figura 6.14</b> Gráfico resultante del simulador en Fase Inicial.	p.91
<b>Figura 6.15</b> Gráfico resultante del simulador en Fase Inicial, Zombis menos inteligentes.	p.92
<b>Figura 6.16</b> Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque.	p.93
<b>Figura 6.17</b> Gráfico alternativo resultante del simulador en Fase Contra Ataque.	p.94
<b>Figura 6.18</b> Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque, Zombis menos inteligentes.	p.95
<b>Figura 6.19</b> Gráfico alternativo resultante del simulador en Fase Contra Ataque, Zombis menos inteligentes.	p.96
<b>Figura 6.20</b> Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía.	p.97
<b>Figura 6.21</b> Gráfico alternativo resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía.	p.98
<b>Figura 6.22</b> Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, Zombis más inteligentes.	p.99
<b>Figura 6.23</b> Gráfico alternativo resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, Zombis más inteligentes.	p.100



<b>Figura 6.24</b> Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, velocidades similares.	p.101
<b>Figura 6.25</b> Gráfico alternativo resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, velocidades similares.	p.102
<b>Figura 6.26</b> Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, humanos más puntería.	p.103
<b>Figura 6.27</b> Gráfico alternativo resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, humanos más puntería.	p.104
<b>Figura 6.28</b> Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, ejercito en acción.	p.105
<b>Figura 6.29</b> Escenario Inicial 28 días después en Simulador.	p.106
<b>Figura 6.30</b> Gráfico resultante en Simulador, 28 días después.	p.107
<b>Figura 6.31</b> Escenario Final 28 días después en Simulador.	p.108
<b>Figura 6.32</b> Gráfico resultante mediante ecuaciones de 28 días después.	p.109
<b>Figura 6.33</b> Gráfico alternativo resultante en Simulador, 28 días después.	p.110
<b>Figura 6.34</b> Escenario Inicial Bienvenidos a Zombieland en Simulador	p.112
<b>Figura 6.35</b> Gráfico resultante en Simulador, Bienvenidos a Zombieland.	p.112
<b>Figura 6.36</b> Escenario Final Bienvenidos a Zombieland en Simulador.	p.113
<b>Figura 6.37</b> Gráfico resultante mediante ecuaciones de Bienvenidos a Zombieland.	p.114
<b>Figura 6.38</b> Gráfico alternativo resultante en Simulador, Bienvenidos a Zombieland.	p.115
<b>Figura 6.39</b> Escenario Inicial La noche de los muertos vivientes en Simulador.	p.116
<b>Figura 6.40</b> Gráfico resultante en Simulador, La noche de los muertos vivientes.	p.117
<b>Figura 6.41</b> Escenario Final La noche de los muertos vivientes en Simulador.	p.118
<b>Figura 6.42</b> Gráfico resultante mediante ecuaciones La noche de los muertos vivientes.	p.119
<b>Figura 6.43</b> Gráfico alternativo resultante en Simulador, La noche de los muertos vivientes.	p.120

## SUMARIO DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Tabla de IBP, clasifica la dificultad de una ruta.	p.19
<b>Tabla 1.2</b> Tabla Dificultad barrera geográfica.	p.20
<b>Tabla 3.1</b> Proporción de infectados de Polio para cada una de sus formas de epidemia de 1933.	p.37
<b>Tabla 4.1</b> Evolución población española.	p.53
<b>Tabla 4.2</b> Población España por edad.	p.53
<b>Tabla 4.3</b> Tabla de grupos de edad en España.	p.54
<b>Tabla 4.4</b> Tabla de grupos de edad en España, considerando discapacitados.	p.54
<b>Tabla 4.5</b> Tabla de grupos de Susceptible en España.	p.55
<b>Tabla 4.6</b> Tabla de grupos de Zombis.	p.55
<b>Tabla 4.7</b> Población histórica Estados Unidos.	p.62
<b>Tabla 4.8</b> Grupos de edad en Estados Unidos en 2010.	p.63
<b>Tabla 4.9.</b> Grupo de edad en Estados Unidos con valores absolutos.	p.63
<b>Tabla 4.10</b> Grupo de edad en Estados Unidos con valores absolutos, teniendo en cuenta discapacitados.	p.64

## INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS

Desde hace varias décadas uno de los principales objetivos de la medicina y la sanidad es adelantarse o prevenir las enfermedades infecciosas, dotar al gestor sanitario de herramientas que permitan predecir el comportamiento de la propagación de dichas enfermedades, de esta forma poder establecer y simular distintas estrategias de control. Estas herramientas son fruto de un trabajo multidisciplinar, donde matemáticos generan algoritmos o modelos matemáticos que luego son implementados computacionalmente.

A lo largo de este trabajo trataremos de verificar y comparar el uso de alguno de estos modelos que fueron creador para una posible epidemia ficticia como sería la Zombi con alguna enfermedad infecciosa como lo fue la Poliomielitis.

Este trabajo es la continuación del trabajo de fin de grado de Adrià Molina Alcaide [26], donde hace la introducción de varios de los modelos matemáticos existentes para una epidemia Zombi.

En el presente trabajo intentaremos ampliar el estudio realizado por Adrià, a la vez que se aplicaran mejoras en algunos modelos que quedaron por analizar.

Para ello nos hemos marcado los siguientes objetivos:

- Comprobar la utilidad de los modelos matemáticos propuestos por Munz (2019) para analizar epidemias zombis en la ficción Y su relación con las epidemias víricas de la realidad.

- Mejorar el modelo de erradicación impulsiva propuesto por Munz para que resulte más realista.

- Aplicar el modelo SIR con subpoblaciones separadas y aplicarlo en modelos más realistas.

- Ampliar la recopilación y estudio de la información de otros autores que han tratado el tema de la epidemia zombi como una enfermedad vírica.

- Implementar un simulador interactivo a nivel usuario con el que se puedan analizar gráficamente los modelos teóricos analizados y desarrollados.

Para cumplir los objetivos anteriormente nombrados hemos dividido el trabajo en los siguientes capítulos:

**Capítulo 1:** Modelos Matemáticos para la Propagación de epidemias

En este capítulo se hace una introducción a algunos modelos matemáticos existentes para las epidemias reales, así como en una hipotética epidemia Zombi.

**Capítulo 2:** Philip Munz (2009) y sus modelos

En este capítulo se hace un análisis en profundidad de los modelos matemáticos para una epidemia Zombi de Philip Munz

**Capítulo 3:** Modelos de Munz aplicados a la realidad

En este capítulo se verificará el funcionamiento de los modelos matemáticos de Munz en una enfermedad infecciosa real.

**Capítulo 4:** Modelos de Munz mejorados

En este capítulo se aplicarán algunas mejoras a los modelos de Munz.

**Capítulo 5:** Sistemas Complejos

En este capítulo se hace una introducción de los sistemas complejos y su uso para poder predecir el comportamiento de una epidemia.

**Capítulo 6:** Modelos Basados en Agentes Vivos

En este capítulo se hace un estudio de las diferentes herramientas computacionales existentes para uso de sistemas complejos.

**Capítulo 7:** Conclusiones finales

En este capítulo se presentan las conclusiones finales del trabajo, así como algunas líneas de continuación del mismo.

## 1. MODELOS EPIDEMIOLÓGICOS

En 1972 Kermack y McKendrick introdujeron el modelo SIR (Susceptibles-Infectados-Retirados), un modelo matemático basado en sistemas de ecuaciones diferenciales para describir la forma en que afectaría y se propagaría una enfermedad producida por un virus u otro agente infeccioso. Convirtiéndose en una herramienta muy útil para el análisis de enfermedades infecciosas.

Existen más modelos propuestos, variantes del básico modelo SIR y otros basados en la idea principal de este modelo como [1]:

- Modelo SIR con nacimientos y muertes. En este modelo se tiene en cuenta además de lo que más adelante veremos en el modelo SIR, la tasa de natalidad y la tasa de mortalidad.
- Modelo SIS con nacimientos y muertes. En este modelo solo existen dos grupos (Infectados y Susceptibles), no se considera a ningún individuo como inmune y también a la enfermedad como no letal ya que no existen los Retirados.
- Modelo SIRS, este modelo es otra extensión del modelo SIR básico donde se tiene en cuenta que un Retirado puede volver a ser Susceptible.
- Modelo SEIS. En este modelo desaparece también el grupo de Retirados y se considera otro grupo, el de Expuestos, en este grupo han estado expuestos a la enfermedad y contagiados. Lo particular de este grupo es que está en fase de incubación de la enfermedad. Durante esta fase los infectados son asintomáticos, pero tampoco pueden contagiar a otros individuos.
- Modelo SEIR, igual que el modelo SEIS pero teniendo en cuenta el grupo de Retirados.
- Modelo MSEIR, este modelo es una versión extendida del modelo SIR, donde se tiene en cuenta la tasa de nacimiento y mortalidad. Además, también una clase M que son los niños con inmunidad pasiva. Estos niños, pasado un tiempo, pueden perder la inmunidad y pasar al grupo de Susceptibles.

### 1.1 MODELO SIR

#### 1.1.2 MODELO SIR BÁSICO

El modelo SIR básico explica la evolución de una enfermedad contagiosa por cualquier tipo de patógeno (virus o bacterias). El modelo consiste en un sistema de tres ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales que no posee una solución explícita y consta de los siguientes grupos [26].

- $S(t)$  : Representa el número de individuos susceptibles, es decir, individuos sanos que no han enfermado anteriormente y por lo tanto pueden resultar infectados al entrar en contacto con la enfermedad.

•  $I(t)$  : Representa el número de individuos infectados, es decir, individuos que pueden contagiar la enfermedad al grupo  $S(t)$  .

•  $R(t)$  : Representa el número de individuos retirados, es decir, individuos que se han recuperado de la enfermedad y se han vuelto inmunes o han muerto, sea como sea no pueden transmitir la enfermedad de nuevo ni volver a enfermar.

El flujo de individuos de un grupo a otro se da de la siguiente manera:

$$S \rightarrow I \rightarrow R$$

Este modelo está basado en las siguientes hipótesis:

- Los individuos del grupo de los infectados, pasado un cierto tiempo se recuperan de la enfermedad adquiriendo inmunidad a esta o mueren. En ambos casos pasan al grupo de los retirados ya que no son capaces de contraer la enfermedad de nuevo ni transmitirla.
- La población se mantiene constante, es decir, no se tienen en cuenta los nacimientos y muertes que se producen a lo largo del desarrollo de la enfermedad. Esta hipótesis es razonable para epidemias de corta duración.
- La enfermedad se transmite por contacto directo entre personas.
- La tasa de infección, que determina el número de individuos por unidad de tiempo que se transfieren del grupo de los susceptibles a los infectados, es proporcional al producto de  $S(t) * I(t)$  .

Dada una población fija  $N = S(t) + I(t) + R(t)$  , Kermack y McKendrick plantearon las siguientes ecuaciones diferenciales para describir el modelo:

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)I(t)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t)$$

En estas ecuaciones encontramos el parámetro  $\beta$  que representa la tasa de contagios, es decir, la probabilidad de que un individuo susceptible enferme al estar en contacto con un infectado. Y  $\gamma$  ,  $\frac{1}{\gamma}$  donde representa el tiempo promedio de infección, es decir, el tiempo medio que permanece un individuo infectado antes de recuperarse o morir.

### 1.1.3 MODELO SIR APLICADO A UNA EPIDEMIA ZOMBI

En 2016 unos estudiantes (C.T. Davies, K.J. Cheshire, R. Garratley, J. Moore) del departamento de física y astronomía de la universidad de Leicester, analizaron una posible epidemia zombi a escala mundial utilizando el modelo SIR como base y modificándolo para adaptarlo a una epidemia Zombi [2]. Este modelo tal como comenta Adrià [26] podría llamarse el modelo SZD ya que son los grupos que ellos describen en el mismo (Susceptibles, Zombis, Muertos “Death”), las fórmulas que utilizan para dicho modelo son las siguientes, resultados similares a los obtenidos por Adrià Molina en su TFG [26], realizados nuevamente para respaldar los resultados obtenidos:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{SZ}{N}$$

$$\frac{dZ}{dt} = \beta \frac{SZ}{N} - \gamma Z$$

$$\frac{dD}{dt} = \gamma Z$$

Para simular una epidemia zombi a escala mundial usaron los siguientes valores iniciales de las variables:

- $N = 7.5 \cdot 10^9$  y  $S(0) = 7.5 \cdot 10^9$ , ya que tomaron la población mundial del año 2016, 7500 millones de personas.
- $I(0) = 1$ , ya que consideran que el brote se desencadena a partir de un único infectado.
- $\beta = 0.9$ , consideran una tasa de contagio elevada, del 90% para la epidemia Zombi.
- $\gamma = 0.05$ , consideran este valor ya que 20 días es el tiempo que un humano puede aguantar sin comida y lo extrapolaron a los Zombis,  $\gamma = \frac{1}{20} = 0.05$ .

Así podemos ver que cuando un Susceptibles y Zombis se topan vienen dados por  $\frac{SZ}{N}$ , si  $dt$  representa un día, entonces cada día  $\beta \frac{SZ}{N}$  Susceptibles resultarán infectados, y  $\gamma Z$  zombis morirán generando así el movimiento entre grupos dentro del modelo, Adrià [26].

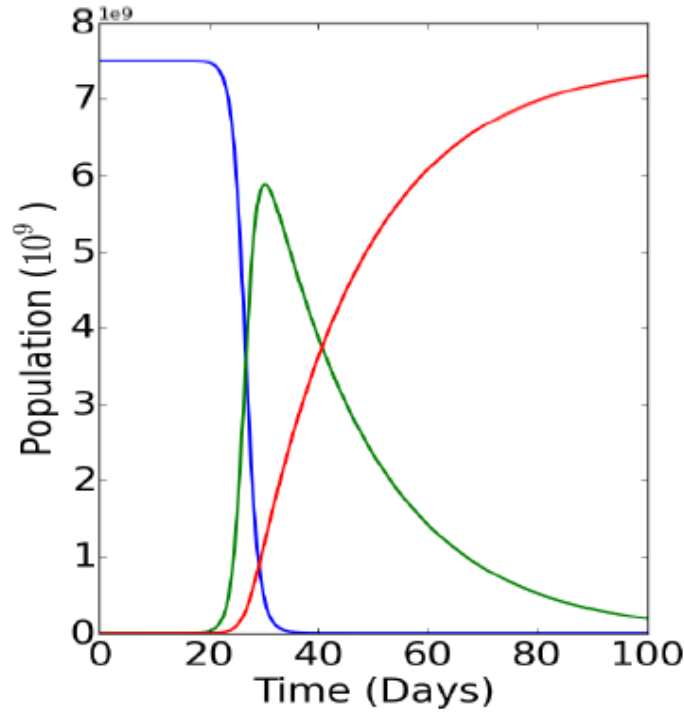


Figura 1.1 Simulación de Modelo SIR aplicado a una epidemia Zombi. Fuente: [2].

### 1.1.3 MODELO SIR APLICADO A UNA EPIDEMIA ZOMBI EN SUBPOBLACIONES SEPARADAS

Para tratar de hacer este modelo más preciso, los autores del estudio [2] lo alteraron para poder añadir el hecho de que las diferentes poblaciones susceptibles a ser infectadas se encuentran geográficamente separadas, Adrià [26] ya introdujo este modelo que volvemos a analizar para luego introducir mejoras.

Para ello modificaron el modelo antes explicado de la siguiente forma:

$$\frac{dS_i}{dt} = -\beta \frac{S_i * Z_i}{N_i}$$

$$\frac{dZ_i}{dt} = \beta \frac{S_i * Z_i}{N_i} - \gamma Z_i + \mu Z_{i+1}$$

$$\frac{dD}{dt} = \gamma Z$$

Donde la población está dividida en  $i$  regiones adyacentes separadas, cada región con una cantidad de Susceptibles, Zombis y Muertos, cada subpoblación tiene su propia población  $N_i$ , por ejemplo para  $i = 1$ ,  $N = 2.5 * 10^9$

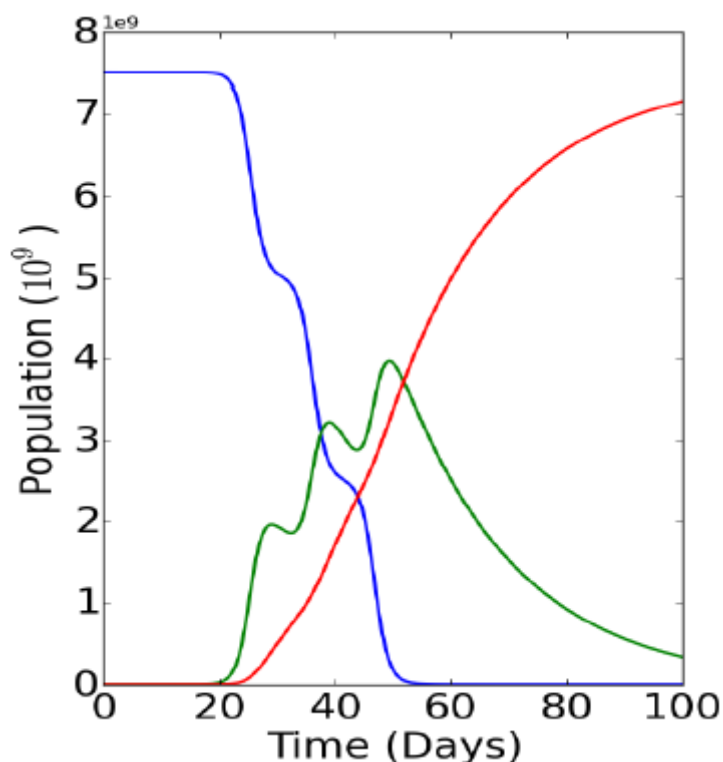


Esta modificación añade la variable  $\mu$  que es el número necesario de zombis en una misma región para que puedan moverse hasta la región contigua y así continuar la epidemia. Para esta variable se tiene en cuenta las barreras geográficas y la velocidad con la que los Zombis puedan superarlas para seguir contagiando las regiones adyacentes.

Del mismo modo este modelo restringe la posibilidad de moverse los zombis únicamente a regiones contiguas, con lo cual un grupo de zombis de la región 1 una vez se cumpla el requisito de población marcado por  $\mu$  solo podrán moverse a la región 2, y de la misma manera de la 2 a la tres, pero nunca podrán saltar de la región 1 a la 3.

$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$  Pero no  $1 \rightarrow 3$

Por lo tanto  $\mu$  determinara la capacidad y velocidad con la que los Zombis pueden llegar a la región contigua. Los autores usan  $\mu = 10^{-5}$ , de esta manera los Zombis solo podrán salir y entrar en otra región a infectar cuando superen los  $10^5$  Zombis en la región ya infectada. Esto evita, por ejemplo, que 0,01 zombis comiencen una infección a través de una barrera geográfica cuando la población en su región es  $10^3$  y, por lo tanto, está por debajo del umbral permitido para avanzar la infección a la siguiente región.



**Figura 1.2** Simulación modelo SIR aplicado en una epidemia Zombi con Subpoblaciones separadas. Fuente: [2].

Este artículo no tienen en cuenta ni la tasa de mortalidad ni natalidad, ya que tratan un brote epidémico de corta duración, además toman como probabilidad de que un Zombi infecte a una Susceptible del 90%, con lo que un Zombi puede infectar a un Susceptible

a diario prácticamente, esto es poco realista ya que disminuyes muy rápidamente los Susceptibles. Esto se podría mejorar dando un valor de  $\beta$  más realista, además de tener en cuenta que un humano puede defenderse y matar a un Zombi, lo que daría más capacidad de supervivencia al ser humano.

Como conclusión de este modelo, podemos afirmar que está limitado, ya que no profundiza en las limitaciones que tiene un Zombi en traspasar las barreras, ya que solo se base en la cantidad de Zombis, sin tener en cuenta la realidad de las barreras geográficas (distancia, montaña, ríos...). Además para epidemias de más larga duración se tendría que tener en cuenta la tasa de natalidad y mortalidad, además de lo que ya se ha mencionado, un valor de  $\beta$  más realista y un parámetro que defina la capacidad de un humano para defenderse.

### 1.1.4 MEJORAS AL MODELO DE SUBPOBLACIONES

Para mejorar el modelo con subpoblaciones geográficamente separadas, tenemos que tener muy en cuenta la capacidad que tiene un Zombi para desplazarse y superar las barreras geográficas.

Actualmente existen distintas federaciones, las cuales han implementado métodos para calcular la dificultad de una ruta, tales como:

- MIDE. Método de Información De Excursiones. Recomendado por la Federación Española de Deportes de Montaña y Escalada (FEDME) y la Federación Aragonesa de Montañismo (FAM).

- Guide Pratique de Cotation des Randonnées Pédestres. Elaborada por la Federación Francesa de Senderismo y basada en el índice IBP.

- Classification and Grading for Recreational Trails. De la Oficina Nacional de Caminos de Irlanda.

- Objectifs de qualité des chemins de randonnée pédestre de Suisse.

Aunque no es un método para determinar el grado de dificultad de los itinerarios, ilustra los planteamientos de uno de los países abanderados en la proyección del senderismo.

Sabiendo calcular la dificultad de ruta, podemos determinar que no solo depende de la cantidad de Zombis para que puedan desplazarse de una región a otra, sino que también de la dificultad del terreno, ya que si es muy bajo no tendría que ser el número de Zombis muy elevado.

Para este trabajo cogeremos como idea principal para calcular la dificultad la siguiente tabla:

## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa

### Edson Flores Rosales

Tabla comparativa

Preparación física					Clasificación de la ruta	
Muy baja	Baja	Media	Alta	Competición		
0 - 5	0 - 10	0 - 20	0 - 40	0 - 60	Muy fácil	<i>"Mejor no haber salido"</i>
5 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 65	60 - 90	Fácil	<i>"Igual no nos hemos ganado ni el almuerzo"</i>
10 - 20	20 - 30	40 - 60	65 - 90	90 - 130	Fácil - media	<i>"Aquí puede que nos merezcamos un bocadillo y poco mas"</i>
20 - 30	30 - 40	60 - 80	90 - 120	130 - 170	Media	<i>"Esta la podemos contar"</i>
30 - 40	40 - 55	80 - 100	120 - 160	170 - 220	Media - dura	<i>"Esto empieza a ser serio, aquí se ha sudado la camiseta"</i>
40 - 50	55 - 80	100 - 130	160 - 210	220 - 280	Dura - muy dura	<i>"De estas una cada dos meses, mas no"</i>
50 - 60	80 - 100	130 - 180	210 - 260	280 - 350	Muy dura - durísima	<i>"De estas 2 al año como mucho"</i>
mas de 60	mas de 100	mas de 180	mas de 260	mas de 350	Sin clasificar	<i>"sin comentarios..."</i>
Preparación muy baja:			casi nunca sale, principiante.			
Preparación baja:			sale una vez cada dos o tres meses.			
Preparación media:			sale regularmente una vez por semana con los amigos habituales.			
Preparación alta:			sale al menos una vez por semana, se apunta a las salidas organizadas, hace salidas de varios días.			
Preparación competición:			sale dos tres veces por semana, controla los tiempos se apunta a las competiciones.			

**Tabla 1.1** Tabla de IBP, clasifica la dificultad de una ruta. Fuente: [9].

En esta tabla podemos observar la clasificación de dificultad según el individuo, por ejemplo:

Para una persona con una preparación física alta, una ruta con una dificultad de 60 IBP, sería muy fácil. Este mismo valor de IBP para una persona con una condición física muy baja sería demasiado complicada.

Este valor de IBP se calcula a partir de parámetros relacionados con las posibles barreras geográficas en las que un caminante puede encontrarse, como pendientes, distancia, etc.

Para nuestro caso simplificaremos más este modelo, ya que supondremos que un Zombi no puede nadar y su condición física sería baja dado que el tipo de Zombi que trataremos no es demasiado rápido, por lo que el IBP máximo que podemos tener es de 100. Consideraremos este valor como límite para que un Zombi pueda atravesar geográficamente de una región a otra.

Para obtener el IPB para Zombis tendremos en cuenta:

- Desnivel: metros de desnivel que tiene la ruta en línea recta para llegar de una región a otra.
- Dificultad terreno: Como ríos, barrancos, etc. En los casos de ríos profundos y anchos no se considera la posibilidad de que el Zombi atraviese, igual para barrancos.
- Distancia y Velocidad: Ya que los Zombis no son muy rápidos, más bien son lentos, si la distancia es muy elevada no llegarían a su destino, ya que morirían pasado unos 20 días. Como velocidad de caminata, tomaremos 5km/h que es la velocidad de paseo de un humano, lo que daría como límite de recorrido de un Zombi de 2.400km. Superada esta distancia el Zombi no sería capaz de atravesar de una región a otra.

La dificultad del terreno puede resumirse en la siguiente tabla:

DIFICULTAD BARRERA GEOGRÁFICA		
DISTANCIA	DESNIVEL	TERRENO
0-600km Valor:8	Hasta 500m Valor:8	Sin dificultades Valor:8
600-1.200km Valor:16	500-1.000m Valor:16	Todo tipo de terrenos Valor:16
1.200-1.800km Valor:25	1.000-1.500m Valor:25	Todo tipo de terrenos- nieve Valor:25
1.800-2.400km Valor:25-100	1.500m o mas Valor:25-100	Todo tipo de terrenos+técnicas especiales Valor:100

**Tabla 1.2** Tabla Dificultad barrera geográfica. Fuente: [9].

Dando un valor equitativo a cada “nivel” de distancia, desnivel y terreno obtenemos un valor de lambda entre 1 y 100. Donde 100 es imposible que un Zombi supere la barrera geográfica y 20 significa que es más probable que supere la barrera geográfica.

Teniendo en cuenta que si el IBP es 100 es imposible que un Zombi pueda pasar de una región a otra, sin importar la cantidad de Zombis total de la región origen. Por lo tanto, recordando las ecuaciones originales de este modelo:

$$\frac{dS_i}{dt} = -\beta \frac{S_i * Z_i}{N_i}$$

$$\frac{dZ_i}{dt} = \beta \frac{S_i * Z_i}{N_i} - \gamma Z_i + \mu Z_{i\pm 1}$$

$$\frac{dD}{dt} = \gamma Z$$

Modificaremos la segunda ecuación, aplicando un condicionante según  $\lambda$  :

$$\frac{dZ_i}{dt} = \beta \frac{S_i * Z_i}{N_i} - \gamma Z_i + \lambda \mu Z_{i\pm 1}$$

Por lo que ahora, a medida que la dificultad del terreno aumente, la cantidad de Zombis que harán falta para pasar de una región a otra será más elevada, ya que muchos morirían en el intento o les sería demasiado complicado, a mayor número de Zombis que intenten cruzar más posibilidades tendrían.

Por otra parte, en el modelo se usa  $\beta = 0.9$ , este valor representa la tasa de contagio en un encuentro entre un Zombi y un Susceptible. Este valor del 90% es muy poco realista ya que los humanos son seres más inteligentes y tienen una capacidad superior a la de los Zombis de ganar en un encuentro con estos.

Por lo que también podríamos añadir una variable, que defina esta capacidad y que equilibre la  $\beta$ , llamaremos a esta variable  $\sigma$ .

$\sigma$  Representará la capacidad de que un humano mate a un Zombi y no quede contagiado, por lo que las Ecuaciones quedarían:

$$\begin{aligned}\frac{dS_i}{dt} &= -\beta \frac{S_i * Z_i}{N_i} \\ \frac{dZ_i}{dt} &= \beta \frac{S_i * Z_i}{N_i} - \gamma Z_i - \sigma \frac{S_i * Z_i}{N_i} + \frac{\mu}{\lambda} Z_{i\pm 1} \\ \frac{dD}{dt} &= +\sigma \frac{S_i * Z_i}{N_i} + \gamma Z_i\end{aligned}$$

Para equilibrar coeficientes  $\beta$  y  $\sigma$ , podríamos tomar como valores:

$$\beta = 0.4$$

$$\sigma = 0.6$$

Estos valores son muchos realistas que los simulados en el artículo, ya que las personas actualmente tenemos bastante conocimiento sobre cómo nos infectamos y podemos evitarlos de mejor forma, un 90% de contagio de demasiado elevado para cualquier infección actual.

Un 60% de victoria frente a un Zombi también es más realista, somos más inteligente, incluso sin armas en situaciones extremas el ser humano sabe reaccionar y defenderse frente a un peligro de muerte.

Esta ecuación teniendo en cuenta más parámetros que presentamos como mejora es menos pesimista para la humanidad y nos daría ventaja en una guerra contra los Zombis si nos enfrentáramos en subpoblaciones separadas geográficamente, además de dar unos valores más realista a los parámetros ya existentes en el estudio original [2].

## 2. PHILIP MUNZ Y SUS MODELOS

En 2009 cuatro profesores de matemáticas (Philip Munz, Ioan Hudea, Joe Imad y Robert J. Smith?) de las universidades de Carleton y Ottawa en Canadá, publicaron un artículo titulado *When zombis attack!: Mathematical modelling of an outbreak of zombi infection*[3], el que traducido sería *Cuando atacan los zombis!: Modelización matemática de una epidemia con infección zombi*.

En este artículo proponen varios modelos matemáticos para estudiar una posible epidemia zombi, el modelo SZR(Susceptibles, Zombis, Retirados), un modelo más completo que SIR ya que tienen en cuenta la tasa de mortalidad y otros parámetros que más adelante analizaremos para el estudio de una posible epidemia zombi.

Primero proponen un modelo base, el cual una vez justificado matemáticamente y analizado, añaden variaciones del mismo para tener en cuenta varias posibilidades y poder tener controladas más variantes en una epidemia zombi, presentan los siguientes modelos:

- Modelo Base o por sus siglas SZR.
- Modelo con periodo de incubación o por sus siglas SIZR.
- Modelo con cuarentena o por sus siglas SIZRQ
- Modelo con cura o por sus siglas SIZR
- Modelo de erradicación impulsiva

Todos estos modelos tienen en común, una idea muy pesimista de la humanidad, ya que a pesar de que los modelos están planteados sobre el ideal de un zombi no muy inteligente, siempre se plantea una elevada probabilidad de “victoria” a los zombis, a la par de un humano con muy pocos recursos, pudiendo presumirse que todos estos modelos se plantean quizás en un mundo post apocalíptico, un mundo donde el virus que infecta a las personas sanas se comporta de un modo muy particular para infectar y hacer que nos convirtamos en zombis. Invitamos a leer el original en inglés, sobre todo por las demostraciones matemáticas que hay en este.

Seguidamente pasaremos a analizar cada modelo.

### 2.1 MODELO BÁSICO

El modelo básico queda descrito por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dS}{dt} = \Pi - \beta SZ - \delta S$$

$$\frac{dZ}{dt} = \beta SZ + \vartheta R - \alpha SZ$$

$$\frac{dR}{dt} = \delta S + \alpha SZ - \vartheta R$$

$\Pi$  : Representa la tasa de natalidad de la población susceptible, este parámetro no tiene en cuenta en el artículo ya que para brotes de corto plazo lo omiten o consideran nulo.

$\beta$  : Representa la probabilidad de transmisión del virus o “derrota”, que un Susceptible y un Zombi se encuentren, este le ataque y contagie al Susceptible.

$\delta$  : Representa la tasa de mortalidad de los susceptibles por causas ajenas a la epidemia Zombi, causas “naturales”.

$\vartheta$  : Representa la probabilidad de que un individuo del grupo de los retirados resucite como Zombi.

$\alpha$  : Representa la probabilidad de “victoria” o de que, en encuentro entre un Susceptible y un Zombi, el Susceptible mate al Zombi sin quedar infectado.

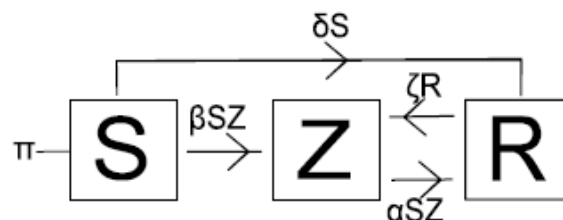
En el artículo aclara que solo los humanos pueden quedar afectados del virus y que los Zombis solo atacan a otros humanos por su carne para alimentarse y no entre ellos. Destacan también que solo hay dos formas de que el número de Zombis aumente:

- Resucitados que acaben de morir, individuos del grupo de Retirados.
- Susceptibles “derrotados” en un encuentro con un Zombi y han sido infectados.

También se tiene en cuenta que al grupo de retirados van los Zombis en los que, en un encuentro con un Susceptible, este ha salido “victorioso” y por lo tanto matado al Zombi destrozando su cabeza. También formaran parte de los retirados, los muertos que no resuciten.

Dada esta situación, nos da a entender que el virus para ser modelizado matemáticamente como epidemia “usa” un virus que se comporta de una manera un tanto peculiar. Este virus afecta a las personas vivas (Susceptibles) que son atacadas por un Zombi, el cual muerde y por medio del contacto de la saliva y la sangre de la herida abierta del Susceptible, este es contagiado. Este comportamiento tiene lógica. Luego también plantea como posibilidad, la de que un Susceptible muera y este resucite como Zombi, lo que da a entender que el virus pueda estar en el medio ambiente o que los Susceptibles sean portadores del asintomáticos del virus hasta morir y que una vez muertos el virus tome control del cuerpo y haga resucitar al Susceptible como Zombi. Esto plantearía cierta discusión para los casos “intermedios”, como alguien con una parte del cuerpo gangrenada, este aspecto se puede usar como continuación a esta investigación.

Para entender mejor lo que plantea Munz en el modelo básico tenemos la siguiente figura:



**Figura 2.1** Muestra la transición de un individuo susceptible (S) a los otros grupos: infectado o zombi (Z) y retirado (R) Fuente: [1].

La figura 2.1 se observa como un individuo puede formar parte de los distintos grupos (Susceptibles, Zombis, Retirados).

Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa  
Edson Flores Rosales

- $\beta SZ$  determina la cantidad de Susceptibles que pasa al grupo de Zombis.
- $\alpha SZ$  determina la cantidad de Zombi que pasa al grupo de Retirados.
- $\beta R$  determina la cantidad de Retirados que resucitan como Zombis.
- $\delta S$  determina la cantidad de Susceptibles que pasa al grupo de Retirados, estos mueren por causas naturales.
- $\Pi$  es la tasa de natalidad, por lo que este parámetro determina la cantidad de individuos nuevos que formaran parte del grupo de Susceptibles

Usando la Figura 1 podemos hacer las siguientes afirmaciones:

$$(\beta N)(S / N)S = \beta SZ$$

$$(\alpha N)(Z / N)S = \alpha SZ$$

Para entenderlo mejor podemos usar un caso práctico, en el que en un transcurso de tiempo de 24h, en un encuentro entre un grupo de 6 Susceptibles y un grupo de 30 Zombis, 5 de estos Susceptibles son infectados, de estos 5, 2 mueren (son devorados por los Zombis, pasan al grupo de Retirados) y otros 3 se convierten en Zombis. Después del encuentro, también 7 Zombis son “asesinados”, por lo que podemos sacar las siguientes conclusiones:

$$\beta = 3 / (6 \cdot 30 \cdot 24) \approx 0.0012$$

$$\alpha = 7 / (6 \cdot 30 \cdot 24) = 0.0016$$

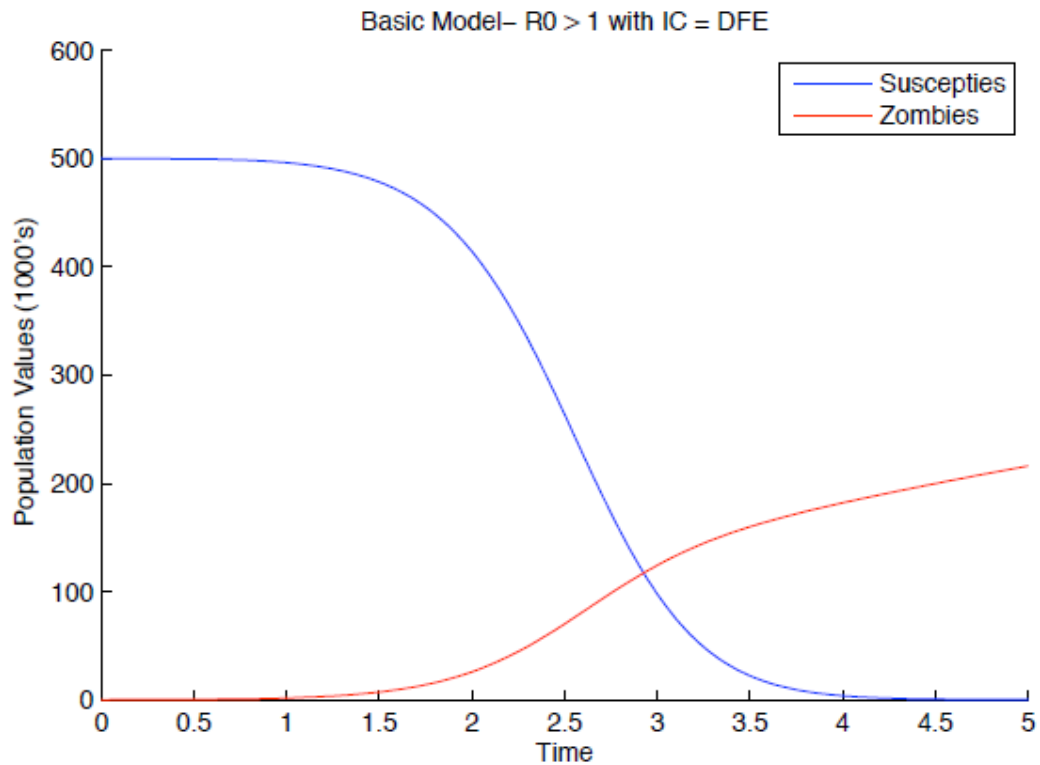
Esta sería la forma por la que obtendríamos el parámetro  $\beta$ , que representa la probabilidad de “derrota” de un Susceptible y el parámetro  $\alpha$  que representa la probabilidad de “victoria” de un susceptible.

Por lo que podemos considerar:

Si  $\alpha < \beta$ ; los Zombis son más efectivos

Si  $\alpha > \beta$ ; los Susceptibles son más efectivos





**Figura 2.2** Gráfico que representa el modelo SZR, vemos como a medida que sube número de Zombies disminuye el de Susceptible. Fuente: [1].

## 2.2 MODELO CON PERIODO DE INCUBACIÓN

El modelo queda descrito por las ecuaciones:

$$\frac{dS}{dt} = \Pi - \beta SZ - \delta S$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SZ - \rho I - \delta I$$

$$\frac{dZ}{dt} = \rho I + \eta R - \alpha SZ$$

$$\frac{dR}{dt} = \delta S + \delta I + \alpha SZ - \eta R$$

Se añaden el siguiente parámetro:

$\rho$  : Variable que representa el tiempo que tarda un infectado en convertirse en zombi.

En este modelo incluye un individuo de un nuevo grupo, los Infectados (I). Un Susceptible pasa a ser Infectado después de la mordida de un zombi, el Susceptible entra en periodo de incubación mientras esta en el grupo de Infectados, en el artículo dan unas 24 horas aproximadamente de tiempo de incubación ( $\rho$ ). En este modelo añade este parámetro, el periodo de incubación que puede variar según el “tipo” de epidemia zombi.

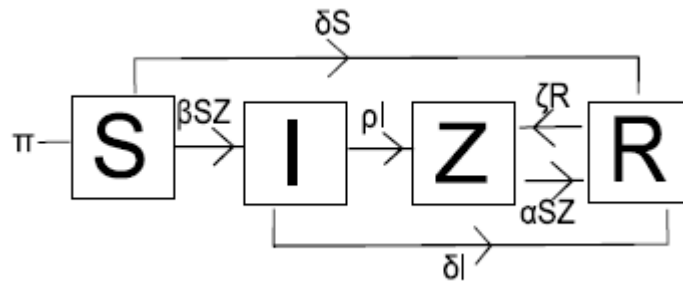
Por lo que:

- El Susceptible infectado antes de convertirse en Zombi, forma parte del grupo de Infectados durante un periodo de tiempo.
- El infectado puede morir por causas “naturales” antes de convertirse en zombi (pasar al grupo de retirados) o convertirse directamente en zombi.

Se debe tener en cuenta que si el infectado muere de forma natural, pasa a depender de otro parámetro ( $\rho$ ) para convertirse en zombi, no es seguro que se convierta en zombi en el 100% de los casos. Algo de cierto modo discutible ya que el virus está en el cuerpo del Retirado por lo que debería resucitar como zombi con toda seguridad. Este sería otro buen punto para mejorar la investigación, tener en cuenta que la probabilidad de que alguien infectado pase a Retirado y luego resucite como Zombi, debería ser más elevada para resucitar como Zombi de alguien con muerte natural “simple” sin estar infectado previamente.

También hay que tener en cuenta que los Susceptibles, Zombis e Infectados no pueden convivir, en este modelo no pueden coexistir, o solo zombis o solo humanos (los retirados no se tienen en cuenta como población “activa” en esta consideración).

Para entender mejor lo que plantea Munz en el modelo con periodo de incubación tenemos la siguiente figura:



**Figura 2.3** Muestra la transición de un individuo susceptible (S) a los otros grupos: infectado (I), zombi (Z) y retirado (R). Fuente:[1].

Esta figura se observa como un individuo puede formar parte de los distintos grupos (Susceptibles, Zombis, Retirados).

Esta figura se observa como un individuo puede formar parte de los distintos grupos (Susceptibles, Zombis, Retirados).

- $\beta SZ$  determina la cantidad de Susceptibles que pasa al grupo de Zombis.
- $\alpha SZ$  determina la cantidad de Zombi que pasa al grupo de Retirados.
- $\rho I$  determina la cantidad de Retirados que resucitan como Zombis.
- $\delta S$  determina la cantidad de Susceptibles que pasa al grupo de Retirados, estos mueren por causas naturales.
- $\rho I$  determina el tiempo que pasa desde que un individuo del grupo de Infectados pasa al grupo de Zombis.
- $\delta I$  determina la cantidad de individuos del grupo de Infectados que pasan al grupo de Retirados por muerte natural.
- $\Pi$  es la tasa de natalidad, por lo que este parámetro determina la cantidad de individuos nuevos que formaran parte del grupo de Susceptibles

Por lo que podemos considerar:

Si  $\rho > \delta$ , el grupo de Zombis aumentará de forma efectiva.

Si  $\rho < \delta$ , grupo de Zombis aumentará de forma menos efectiva.

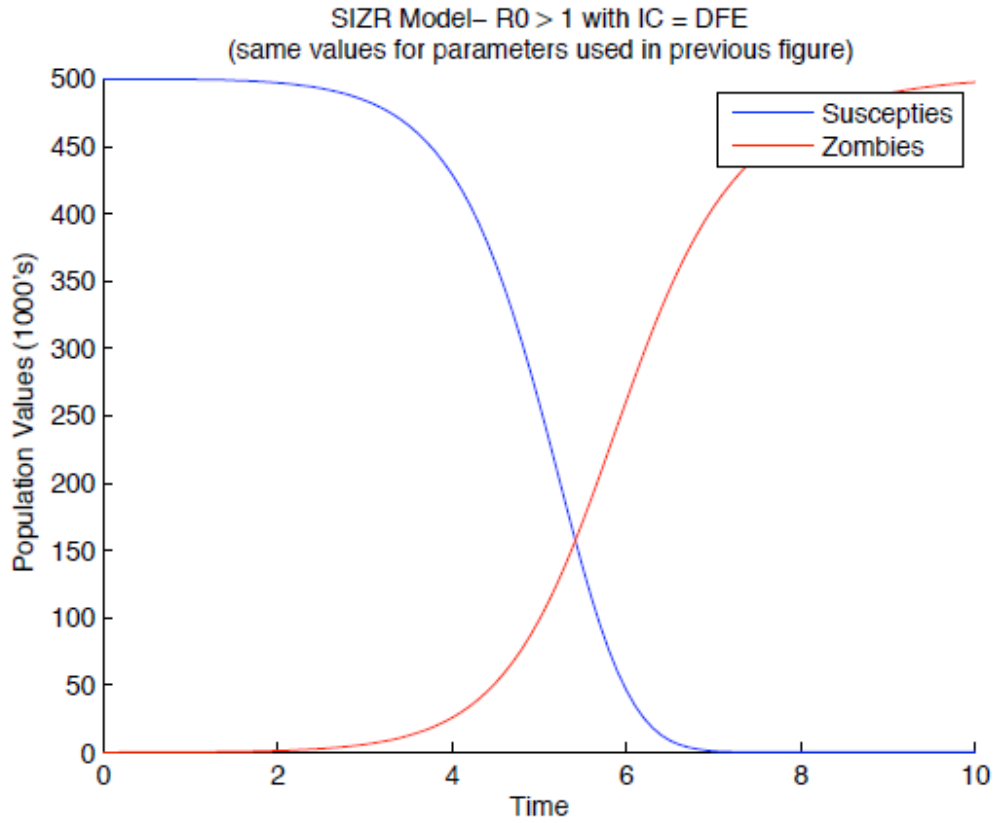


Figura 2.4 Gráfico que representa el modelo SIZR. Fuente: [1].

## 2.3 MODELO DE CUARENTENA

El modelo queda descrito por las ecuaciones:

$$\frac{dS}{dt} = \Pi - \beta SZ - \delta S$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SZ - \rho I - \delta I - \phi I$$

$$\frac{dZ}{dt} = \rho I + \eta R - \alpha SZ$$

$$\frac{dR}{dt} = \delta S + \delta I + \alpha SZ - \eta R - \varepsilon Q$$

$$\frac{dQ}{dt} = \kappa I + \sigma Z - \varepsilon Q$$

Se añaden los siguientes parámetros:

$\kappa$  : Representa el número de infectados que se trasladan al interior de la cuarentena.

$\sigma$  : Representa el número de zombis que se trasladan al interior de la cuarentena.

$\varepsilon$  : Representa la cantidad de zombis e infectados que intentan escapar de la cuarentena y en consecuencia son asesinados antes de lograrlo.

Este modelo propone la idea de combatir la epidemia zombi poniendo en cuarentena a una parte del grupo de Infectados y Zombis, para que estos no puedan contagiar a los Susceptibles.

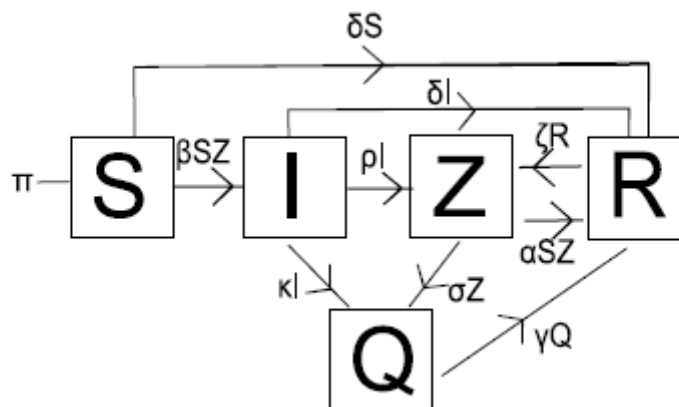
Para esta idea proponen en el artículo lo siguiente:

- En cuarentena solo estarán Infectados o Zombis.
- Si un Infectado o Zombi intentase escapar de la cuarentena, estos serían asesinados inmediatamente.
- Los individuos asesinados, pasarán a la clase de Retirados y serán “liberados” fuera de la cuarentena ya muertos, donde podrán resucitar o no como Zombis.

Analizando las tres situaciones, se plantea algo muy pesimista por parte del Susceptible, que estos no tendrían en cuenta, la posibilidad de que alguien de la clase Retirado pueda resucitar como Zombi y que por lo tanto no siga teniendo a los Retirados en otro tipo de “cautiverio de seguridad”.

Tampoco se especifica, aunque se puede obviar, que los Infectados y los Zombis están en cuarentena por separado.

Para entender mejor lo que plantea Munz en el modelo con cuarentena tenemos la siguiente figura:



**Figura 2.5** Muestra la transición de un individuo susceptible (S) a los otros grupos: infectado (I), zombi (Z), retirado (R) e individuos en cuarentena (Q). Fuente: [1].

- $\beta SZ$  determina la cantidad de Susceptibles que pasa al grupo de Zombis.
- $\alpha SZ$  determina la cantidad de Zombi que pasa al grupo de Retirados.
- $\zeta R$  determina la cantidad de Retirados que resucitan como Zombis.
- $\delta S$  determina la cantidad de Susceptibles que pasa al grupo de Retirados, estos mueren por causas naturales.
- $\rho I$  determina el tiempo que pasa desde que un individuo del grupo de Infectados pasa al grupo de Zombis.

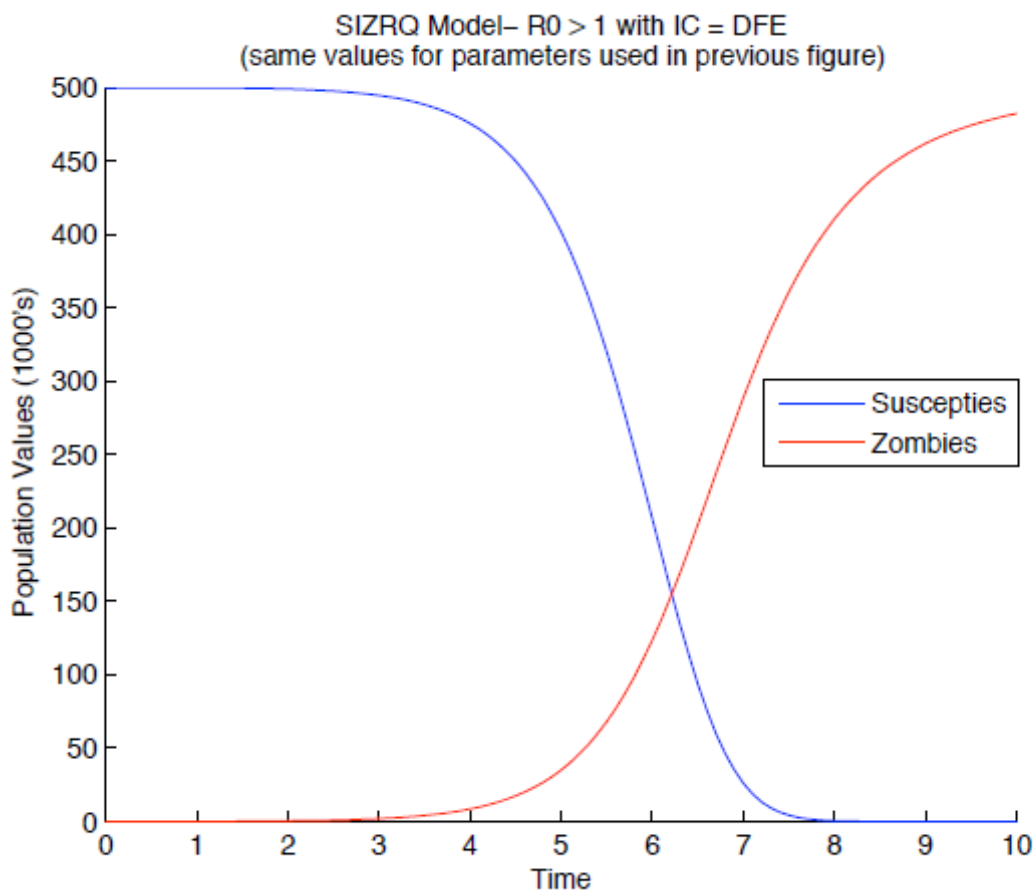
- $\delta I$  determina la cantidad de individuos del grupo de Infectados que pasan al grupo de Retirados por muerte natural.
- $\kappa I$  determina la cantidad de Infectados que pasan a estar en cuarentena
- $\sigma Z$  determina la cantidad de Zombis que pasan a estar en cuarentena.
- $\varepsilon Q$  determina la cantidad de individuos de cuarentena, Zombis o/y Infectados, que son asesinos y pasan al grupo de Retirados.
- $\Pi$  es la tasa de natalidad, por lo que este parámetro determina la cantidad de individuos nuevos que formaran parte del grupo de Susceptibles

Por lo que podemos considerar:

Entre mayor sea  $\kappa, \sigma$ , resultaría más efectivo el modelo de cuarentena para los Susceptibles. Valores bajos sería menos efectivo.

El parámetro  $\varepsilon$  no tendría impacto directo sobre este modelo, en cuanto efectividad ya que luego los Retirados puede resucitar como Zombis.

Para este mismo modelo calcularon la variable  $R_0$  tal como se explica antes, normalmente si  $R_0 < 1$  la enfermedad se erradica, mientras que si  $R_0 > 1$  la enfermedad persistirá.



**Figura 2.6** Gráfico donde se representa el modelo SIZRQ. Fuente: [1].

## 2.4 MODELO CON CURA

El modelo queda descrito por las ecuaciones:

$$\frac{dS}{dt} = \Pi - \beta SZ - \delta S + cZ$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SZ - \rho I - \delta I$$

$$\frac{dZ}{dt} = \rho I + \eta R - \alpha SZ - cZ$$

$$\frac{dR}{dt} = \delta S + \delta I + \alpha SZ - \eta R$$

Se añade el siguiente parámetro:

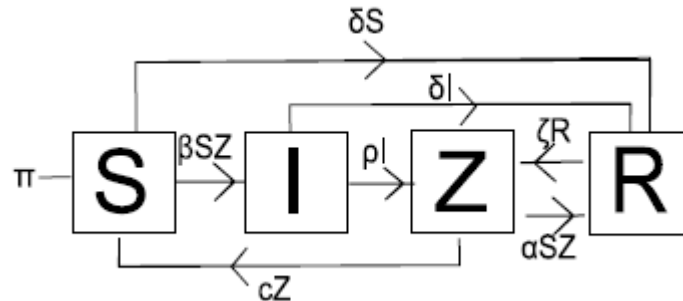
$c$ : representa la cantidad de zombis curados que vuelven a estado susceptible.

Para este modelo se considera que los Susceptibles han sido capaces de encontrar una cura contra el virus, que devuelve al grupo de Susceptible a un individuo del grupo de Zombis. El uso de este tratamiento no da inmunidad al individuo por lo que el nuevo Susceptible puede volver a ser infectado por el ataque de un Zombi o al morir de forma natural y resucitar como tal. Un Susceptible que muere por causas naturales y resucita como Zombi también puede ser curado, por lo que sería un resucitado “real”, lo que deja muchas ideas abiertas, ya que hay causas de muerte natural que no son compatibles con una resurrección “real” (órganos muy dañados...).

Para este modelo se suponen las siguientes cuestiones:

- Desde que se tiene la cura, no se usa más el método de cuarentena.
- La cura permite que un zombi vuelva a su estado humano independientemente si este se ha convertido originalmente en zombi tras haber resucitado o por el ataque de otro zombi.
- Cualquier individuo curado puede volver a ser infectado y convertirse en Zombi.

Para entender mejor lo que plantea Munz en el modelo con cura tenemos la siguiente figura:



**Figura 2.7** Muestra la transición de un individuo susceptible (S) a los otros grupos: infectado (I), zombi (Z) y retirado (R). Fuente: [1].

- $\beta SZ$  determina la cantidad de Susceptibles que pasa al grupo de Zombis.
- $\alpha SZ$  determina la cantidad de Zombi que pasa al grupo de Retirados.
- $\zeta R$  determina la cantidad de Retirados que resucitan como Zombis.
- $\delta S$  determina la cantidad de Susceptibles que pasa al grupo de Retirados, estos mueren por causas naturales.
- $\rho I$  determina el tiempo que pasa desde que un individuo del grupo de Infectados pasa al grupo de Zombis.
- $\delta I$  determina la cantidad de individuos del grupo de Infectados que pasan al grupo de Retirados por muerte natural.
- $cZ$  determina la cantidad de individuos del grupo Zombi que pasan al grupo de Susceptibles.
- $\Pi$  es la tasa de natalidad, por lo que este parámetro determina la cantidad de individuos nuevos que formaran parte del grupo de Susceptibles

Por lo que podemos considerar:

- Un valor alto de  $c$  es crucial para la supervivencia de los Susceptibles, con un valor bajo significaría lo contrario.



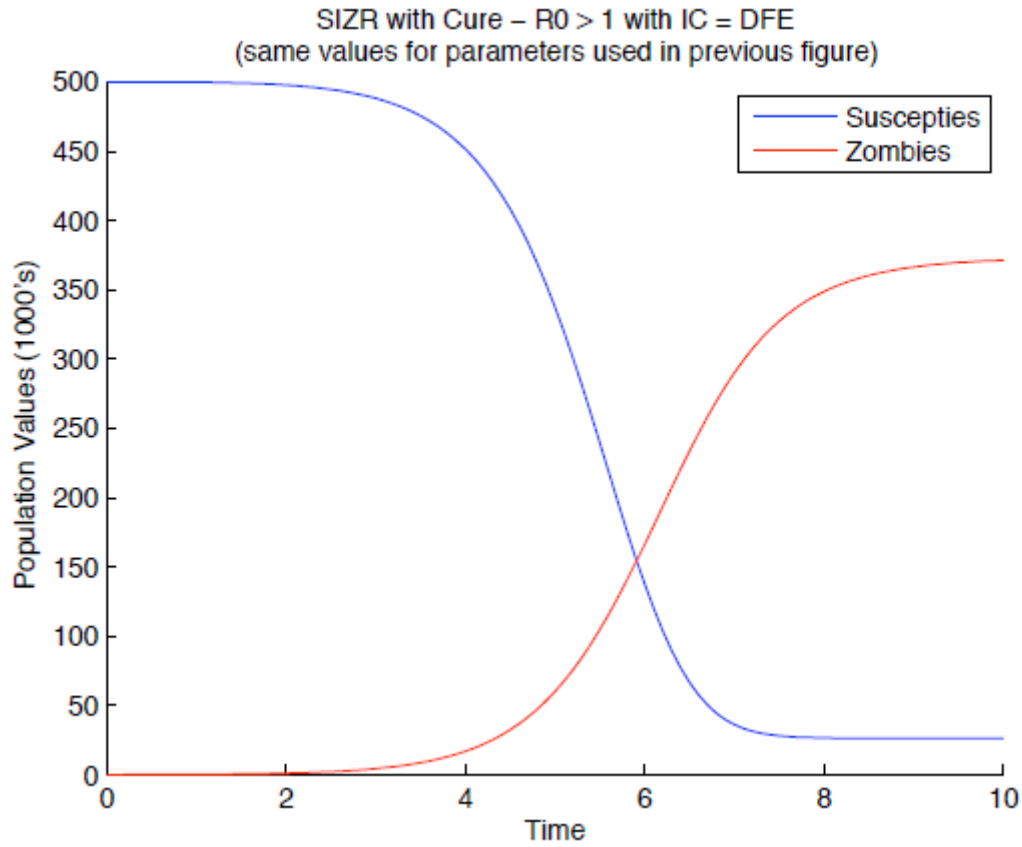


Figura 2.8 Gráfico donde se representa el modelo SZRQ. Fuente: [1].

## 2.5 MODELO DE ERRADICACIÓN IMPULSIVA

El modelo queda descrito por las ecuaciones:

$$\frac{dS}{dt} = \Pi - \beta SZ - \delta S \quad t \neq tn$$

$$\frac{dZ}{dt} = \beta SZ + \vartheta R - \alpha SZ \quad t \neq tn$$

$$\frac{dR}{dt} = \delta S + \alpha SZ - \vartheta R \quad t \neq tn$$

$$\Delta Z = -\kappa n Z \quad t = tn'$$

Se añade el siguiente parámetro:

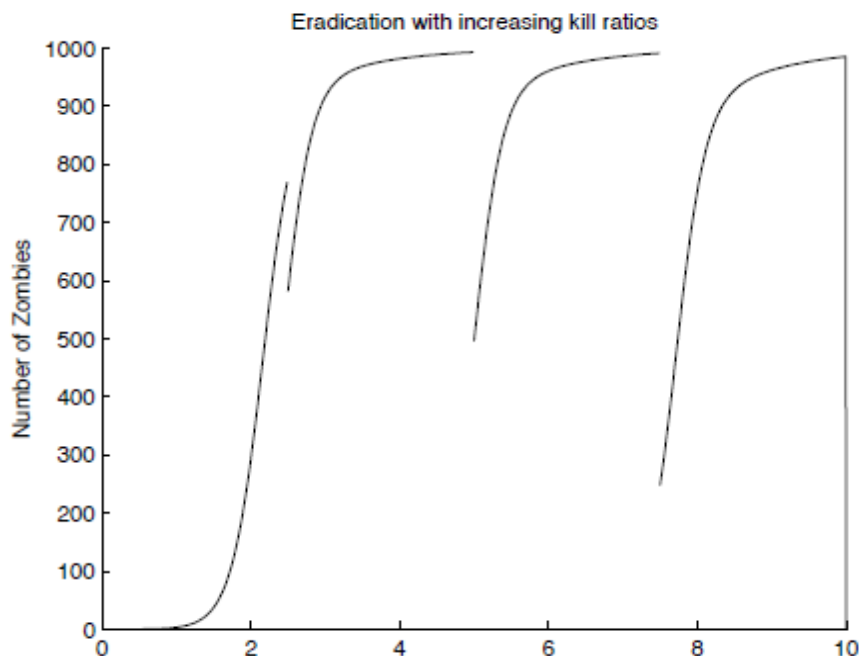
$\kappa$  : Donde  $\kappa \in (0,1]$  es la proporción de matanza, es decir, la proporción de zombis del total que morirán en cada ataque y  $n$  indica el número de ataques necesarios hasta obtener  $\kappa n > 1$ .

Por lo que podemos considerar:

Que simulando este modelo, observaremos que dependiendo del número de incursiones realizadas por los susceptibles en el tiempo de simulación la humanidad sobrevive a la epidemia y erradica a los zombis o si la humanidad es erradicada por éstos.

Un valor de  $n$ , da mayor efectividad a los Susceptible por lo que tendrían más posibilidades de supervivencia.

Este modelo vemos que funciona de la siguiente manera: al tomar el valor del parámetro  $\kappa$ , en este caso  $\kappa = 0.3$ , estamos diciendo que cuando los susceptibles realicen su primer ataque a los zombis, morirán el 30% del total de zombis existentes en ese instante de tiempo, al realizar el segundo ataque morirán el 60% de los existentes en ese instante de tiempo, de la misma manera con el tercer ataque morirán el 90% y con el cuarto se erradicarán ya que los susceptibles serán capaces de matar al 120% de los zombis existentes en ese instante.



**Figura 2.9** Gráfico donde se representa el modelo de Erradicación Impulsiva. Fuente: [1].

## 2.6 CRÍTICA GENERAL A LOS MODELOS

Después de analizar los modelos propuestos por Munz, podemos ya realizar unas críticas:

- La posibilidad de que un Retirado pueda resucitar de forma espontánea como Zombi es discutible.
- Que un Infectado muera de forma “natural” y luego pueda pasar al grupo de Retirados, grupo del que no necesariamente saldrá (resucitara como Zombi).
- En el modelo de Cuarenta, los Susceptibles no tienen en cuenta la posibilidad de resurrección de los Zombis o Infectados asesinados en intento de escapar, lo más lógico sería incinerarlos.
- En caso de usarse la tasa de natalidad y mortalidad, en todo el modelo estas tasas son fijas, lo que no sería del todo correcto ya que esta es variable y actualmente para ello es más útil aplicar modelos Maltusianos, donde se tienen en cuenta más factores para la dinámica de poblaciones y no solo la tasa de natalidad y mortalidad, tales como recursos económicos, agrícolas, escasez de alimentos, etc.

## 3. MODELOS DE MUNZ APLICADOS A LA REALIDAD

De los modelos de Munz descritos anteriormente y analizados de la epidemia zombi del mundo de la ficción, intentaremos ahora buscar una relación dentro del mundo real, para ello usaremos como base una enfermedad vírica real, como es la poliomiелitis

La poliomiелitis también llamada de forma abreviada polio, afecta principalmente al sistema nervioso. La enfermedad es producida por el virus poliovirus. Se transmite de persona a persona a través de secreciones respiratorias o por la ruta fecal-oral. La mayoría de las infecciones de polio son asintomáticas. Solo en el 1% de casos, el virus entra al sistema nervioso central (SNC) vía la corriente sanguínea. Dentro del SNC, el poliovirus preferentemente infecta y destruye las neuronas motoras, lo cual causa debilidad muscular y parálisis aguda flácida.

En 1955, se publicó el World Health Monograph Series No. 26, donde JOHN R. PAUL, Profesor de Medicina Preventiva de la Escuela de Medicina de la Universidad de Yale, New Haven, Conn., E.U.A., presenta el artículo EPIDEMIOLOGIA DE LA POLIOMIELITIS [4], dando un informe detallado de la afectación en diferentes países occidentales de la Polio, en este trabajo nos centraremos en Canadá, del cual obtendremos más información de diferentes fuentes.

Este informe cubre un periodo de entre 1933 y 1952, para obtener datos desde esa fecha hasta la actualidad tenemos que recurrir a un reporte del Gobierno de Canadá, Public Health Agency of Canadá, que publico en noviembre de 2006[5].

Dado que los modelos matemáticos propuestos por Munz se basan en un hipotético caso de epidemia zombi, que hasta ahora solo ha sido posible en el mundo de la ficción, para poder buscar una relación con infección vírica real como es la Polio, la metodología a seguir será:

Respetar los modelos matemáticos junto con sus variables y adaptar lo que representaría estas variables al mundo real, intentado modificar en lo mínimo cada

modelo tratado. Como fecha de inicio de la epidemia tomaremos el año 1933 en Canadá.

### 3.1 MODELO BÁSICO DE MUNZ

A modo de recordatorio, este modelo queda descrito mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dS}{dt} = \Pi - \beta SZ - \delta S$$

$$\frac{dZ}{dt} = \beta SZ + \vartheta R - \alpha SZ$$

$$\frac{dR}{dt} = \delta S + \alpha SZ - \vartheta R$$

En estas ecuaciones encontramos los parámetros definidos en los siguientes anunciados:

$\Pi$  : Representa la tasa de natalidad de la población susceptible, este parámetro para brotes a corto plazo lo supondremos nulo y lo omitiremos.

$\beta$  : Representa la probabilidad de que, en un encuentro entre un Susceptible y un Zombi, el Susceptible quede infectado con el virus zombi.

$\delta$  : Representa la tasa de mortalidad de la población Susceptible por causas ajenas a la epidemia zombi.

$\vartheta$  : Representa la probabilidad de que un muerto (individuo del grupo de los retirados) resucite como Zombi.

$\alpha$  : Representa la probabilidad de que, en un encuentro entre un Susceptible y un Zombi, el susceptible no quede infectado y mate al zombi.

Consultando el artículo inicialmente mencionado [4], podemos dar valores a estas variables, pero antes de ello es necesario adaptar tales parámetros para poder comprobar el uso de este modelo en la realidad, por lo que vamos a analizar el comportamiento de este modelo aplicándolo a un caso real como es el de una enfermedad contagiosa, la polio, exactamente con la Epidemia de polio en Canadá en 1933. Para ello hemos de modificar el anunciado para que el comportamiento de la Polio se adapte al del virus Zombi, al igual que los distintos grupos que aparece en el modelo, Susceptibles, Zombis y Retirados. Quedaría de la siguiente manera.

Susceptibles: Individuos no contagiado de la Polio.

Zombis: Infectados por la Polio.

Retirados: Muertos por la Polio o por causas ajenas.

$\Pi$  : No cambia, tasa de natalidad de la población Susceptible.

$\beta$  : Representa la probabilidad de que en un encuentro entre un Susceptible y un Infectado de la Polio, el Susceptible quede infectado con la polio, este infectado puede presentar o no síntomas a simple vista.

$\delta$  : Igual, Representa la tasa de mortalidad de la población Susceptible por causas ajenas a la epidemia de la Polio.

$\vartheta$  : Representa la probabilidad de que alguien “curado” (luego explicaremos este término, ya que actualmente no existe cura), vuelva a contagiarse.

$\alpha$  : Representa probabilidad de poder evitar a un infectado y poder curarlo, sin quedar infectado.

Dado que en el mundo real hasta el momento no hay cura para la Polio, tan solo una vacuna preventiva, supondremos una cura que en el futuro pueda existir la cura es llamada Draco [6]. Actualmente el tratamiento de la Polio se basa en la vacunación.

Ahora si ya podemos proceder a dar valor a los parámetros:

$\Pi$  : Según datos recogidos en [8], la tasa de natalidad de Canadá en el año 1933 es de 9.7, pero no la tendremos en cuenta.

$\beta$  : La polio es una enfermedad altamente contagiosa, por lo que tomaremos como probabilidad de contagio del 100%, pero dado que Canadá tiene una extensión de 9,985 millones km<sup>2</sup> y durante todo este periodo el pico más alto de casos de Polio fue de 470 casos registrados, podemos decir que habían, 0.00047 infectados por km<sup>2</sup>, pero tenemos que tener en cuenta más factores como:

Forma	Proporción de casos <sup>25</sup>
Asintomático	90-95 %
Enfermedad menor	4-8 %
Meningitis no paralítica aséptica	1-2 %
Poliomielitis paralítica	alrededor de 1 %
— Polio espinal	79 % de los casos de parálisis y por eso se causó la enfermedad
— Polio bulboespinal	19 % de los casos de parálisis
— Polio bulbar	2 % de los casos de parálisis

**Tabla 3.1** Proporción de infectados de Polio para cada una de sus formas de epidemia de 1933. Fuente: [7].

Como observamos en la tabla anterior la mayoría de infectados, aproximadamente más de 95% son asintomáticos, pero pueden contagiar, por lo que enfermos con síntomas rondan el 5% o menos. Lo que nos da un valor de asintomáticos de 42.300 infectados, de un total de 42770 casos. Son unos 0,04 infectados por km<sup>2</sup>. En una población de 10 919 000 habitantes [8].

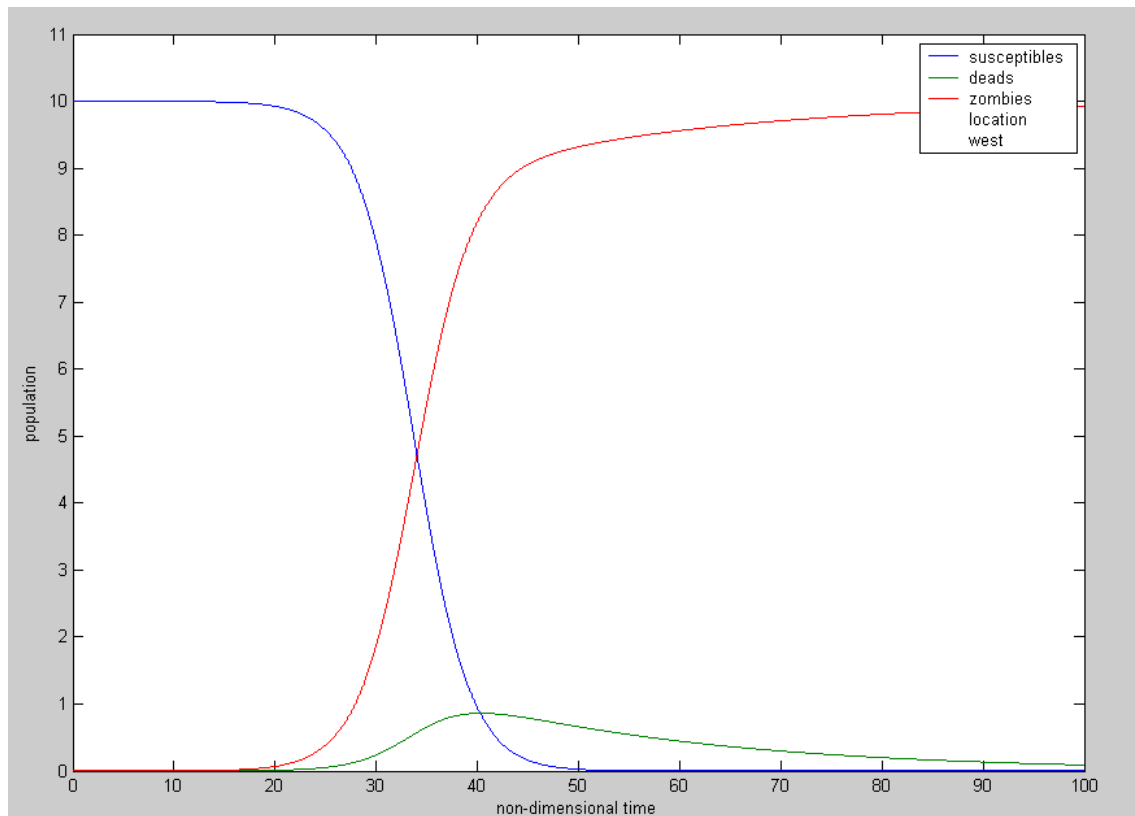
Por lo que  $\beta : 0.04$ .

$\delta$  : Según los datos recogidos, la tasa de mortalidad de Canadá en el año 1933 es de 21.0 [5]. La polio puede causar muerte a un 10% de los infectados, número de muertes relativamente bajo, por lo que no tendremos en cuenta la mortalidad de la polio.

$\vartheta$  : Para este valor obtendremos el mismo valor que para el contagio, 0.04.

$\alpha$  : Dado que evitar un infectado es complicado, ya que los síntomas iniciales pueden confundirse con otra enfermedad y que hay muchos asintomáticos, tomaremos un valor pesimista, 0.005

Con estos valores obtenemos el siguiente gráfico de la resolución de las ecuaciones diferenciales del modelo:



**Figura 3.1** Modelo Básico de Munz aplicado en Canadá en 1933 durante la epidemia de la Polio. Fuente: [4].

Ahora pondremos la gráfica de lo que paso en realidad en el año 1933, así podremos analizar mejor el resultado.

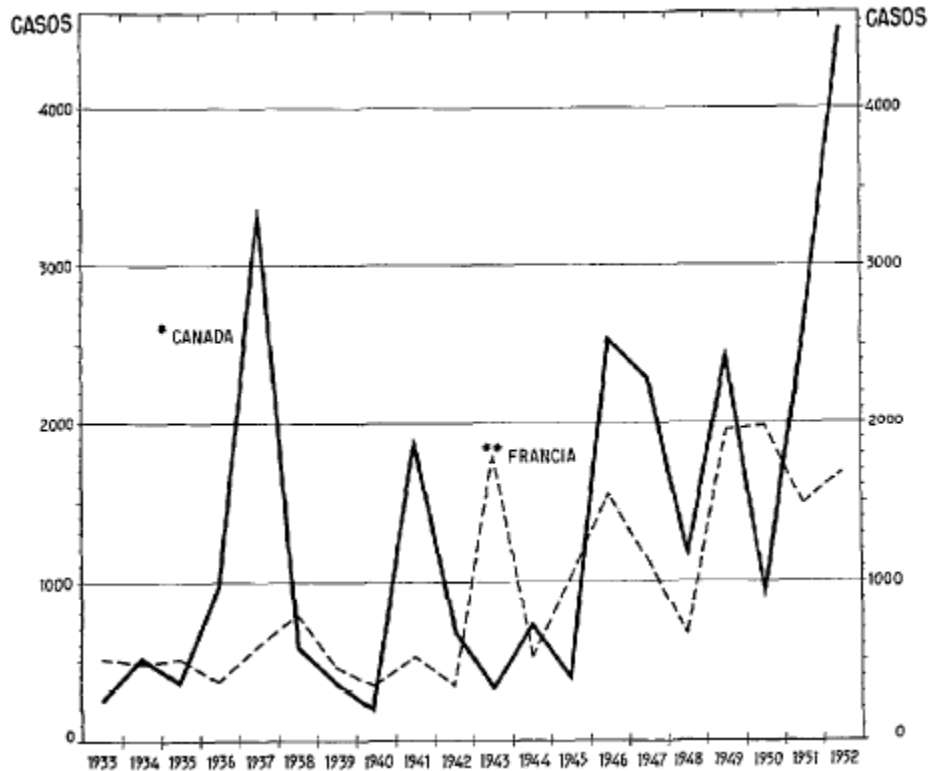


Figura 3.2 Evolución de la polio en Canadá en 1933. Fuente: [4].

Como observamos no podemos adaptar la enfermedad de la Polio al modelo básico de Munz, ya que si nos fijamos en el gráfico vemos el pico más alto se da en el año 1952 donde llegan a haber hasta 5000 casos, pero Munz en su modelo todos los Susceptibles quedarían infectados mucho antes de llegar a tal fecha. Por lo que podemos afirmar que no es válido en este caso. El modelo de Munz es muy pesimista.

### 3.2 MODELO CON PERIODO DE INCUBACIÓN

Este modelo anteriormente explicado queda descrito por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dS}{dt} = \Pi - \beta SZ - \delta S$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SZ - \rho I - \delta I$$

$$\frac{dZ}{dt} = \rho I + \vartheta R - \alpha SZ$$

$$\frac{dR}{dt} = \delta S + \delta I + \alpha SZ - \vartheta R$$

Donde  $I$  es el grupo de Infectados, que son individuos del grupo de susceptibles que

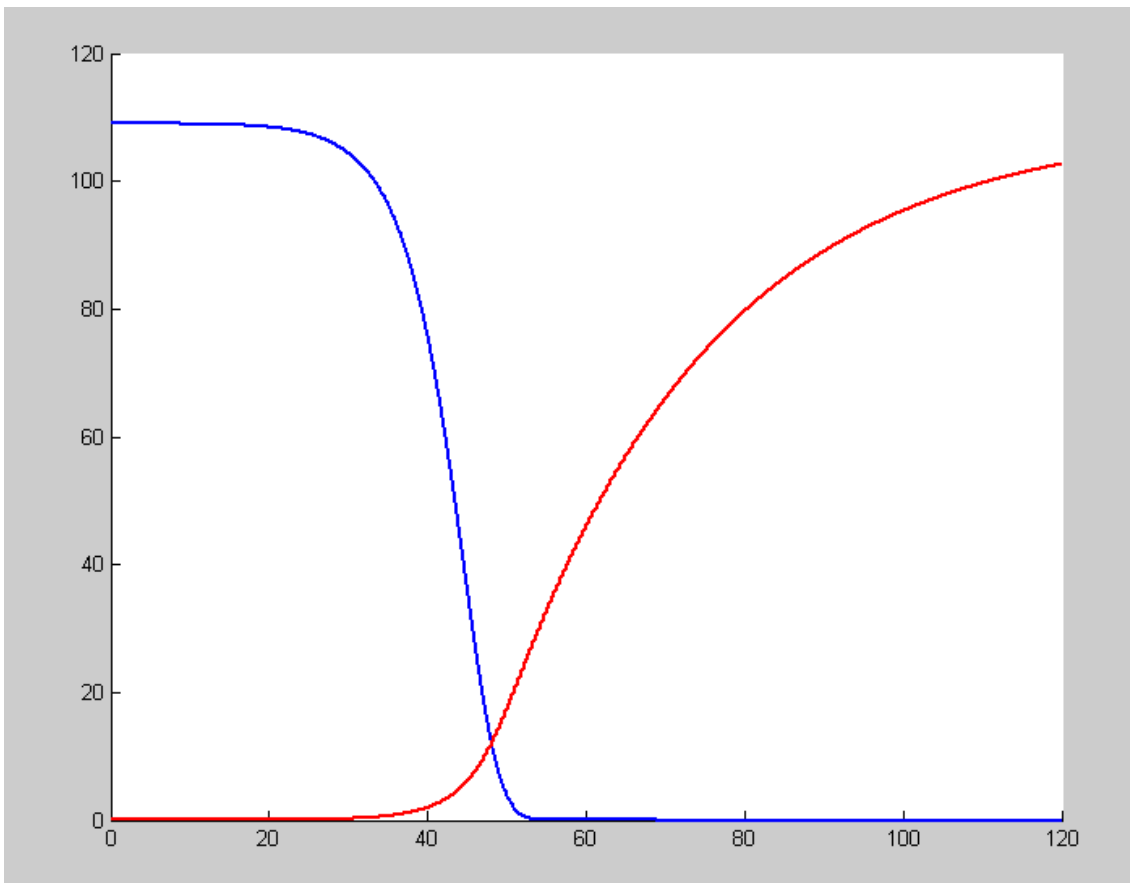
ya han sido infectados por el virus zombi pero que aún no se ha convertidos en zombi.

Volviendo al artículo [1] antes mencionado, podemos dar valores a estos parámetros, pero antes de ello mantendremos los mismos enunciados que ya modificamos en el modelo básico y solo modificaremos el enunciado del parámetro  $P$  y  $I$ , que es el añadido para este modelo, recordemos que  $P$  representa el tiempo que tarda un infectado en convertirse en zombi, que en este caso no son zombis sino enfermos de polio., tal manera que:

$\rho$  : El período de incubación habitual es de 7 a 14 días, con un rango de 3 a 35 días, por lo que tomaremos 35 días de incubación (el máximo), por lo que sería correcto usar 0,038.

$I$  : Serán los enfermos asintomáticos, 42.300 infectados.

$Z$  : Serán los enfermos con síntomas visibles.



**Figura 3.3** Modelo de Munz con periodo Incubación adaptado a la epidemia de Polio en Canadá en 1933.  
Fuente: Propia.

Por lo que podemos observar, tampoco es adaptable el modelo con periodo de incubación, tan solo ralentiza el crecimiento de los “Zombis”, Infectados con síntomas visibles.



### 3.4 MODELO CON CUARENTENA

Este modelo como ya se ha comentado añadía la variable  $\varepsilon$ , que representa la cantidad de zombis e infectados que intentan escapar de la cuarentena y en consecuencia son asesinados antes de lograrlo.

Estos individuos asesinados por su intento de fuga entran en el grupo de los retirados y pueden reanimarse como zombis libres, es decir, fuera de la cuarentena.

Este modelo esta descrito por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dS}{dt} = \Pi - \beta SZ - \delta S$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SZ - \rho I - \delta I - \phi I$$

$$\frac{dZ}{dt} = \rho I + \vartheta R - \alpha SZ$$

$$\frac{dR}{dt} = \delta S + \delta I + \alpha SZ - \vartheta R - \varepsilon Q$$

$$\frac{dQ}{dt} = \kappa I + \sigma Z - \varepsilon Q$$

Para dar valores a estos parámetros podemos usar los mismos del artículo base [4] que estamos usando, pero antes tenemos que adaptar el enunciado de sus parámetros para adaptarlo a este caso real.

Originalmente en el mundo de la ficción eran estos:

$\delta$  : Representa el número de infectados que se trasladan al interior de la cuarentena.

$Q$  : Representa el número de zombis que se trasladan al interior de la cuarentena.

$\varepsilon$  : Representa la cantidad de zombis e infectados que intentan escapar de la cuarentena y en consecuencia son asesinados antes de lograrlo.

Trasladado al mundo real, quedarían de la siguiente forma:

$\delta$  : Representa el número de enfermos asintomáticos que se trasladan al interior de la cuarentena.

$Q$  : Representa el número de enfermos con síntomas claros de la infección que se trasladan al interior de la cuarentena.

$\varepsilon$  : Representa la cantidad de enfermos, el cual los efectos de la polio son tan avanzados y dolorosos, que pedirían la eutanasia.

Usaremos valores bajos tanto para  $\delta$  ya es difícil detectar un enfermo asintomático y para  $Q$ , dado que los síntomas se pueden confundir inicialmente con otras enfermedades en sus primeros días de infección.

También se espera  $R_0 > 1$ , así que utilizando las fórmulas del modelo hallamos que el valor máximo que deberá tener D será de  $D = 0,045$ .

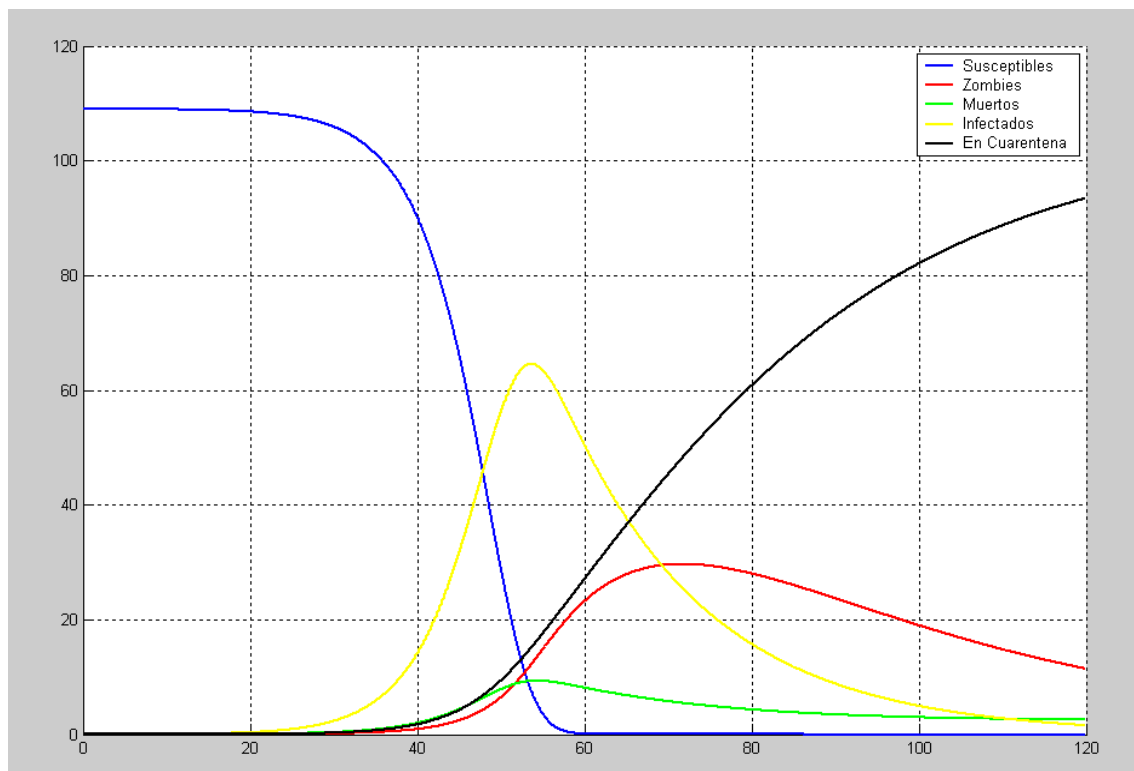
En cuanto la E, el porcentaje de pacientes que sufren parálisis es del 1% total, daremos como valor  $\varepsilon = 0,001$ .

Como resultado de lo anterior tenemos:

$$\delta = 0,02$$

$$Q = 0,04$$

$$\varepsilon = 0,001$$



**Figura 3.4** Modelo de Munz con Cuarentena adaptado a la epidemia de Polio en Canadá.  
Fuente: Propia.

Este modelo refleja mejor lo que fue la Polio en Canadá (1933), dado que el porcentaje de Infectados detectables es muy bajo, los pacientes en cuarentena serían los portadores asintomáticos y los “Zombis” que en este caso (para adaptar la ficción a la realidad) son los portadores sintomáticos (enfermos), los susceptibles quedarían rápidamente reducidos por la complejidad de diferenciar asintomáticos con personas sanas.

### 3.5 MODELO CON CURA

Para este modelo consideraremos que los humanos hemos sido capaces de acabar de desarrollar Draco [6], la supuesta vacuna para la polio, en 1933, cuando la enfermedad de la Polio aún estaba extendida en Canadá. Draco [6] funcionaría como cura para la Polio, pero no da inmunidad al paciente por lo que la persona curada vuelve a ser Susceptible a la infección. Esta cura no es completamente efectiva ya que solo es efectiva durante los primeros días de la infección y no se puede fabricar suficiente como para administrar a cualquier sospecha de contagio mínima, pero mantendremos la idea original de Munz de no necesitar la cuarentena, así que para este modelo es suprimida.

El modelo esta descrito por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dS}{dt} = \Pi - \beta SZ - \delta S + cZ$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SZ - \rho I - \delta I$$

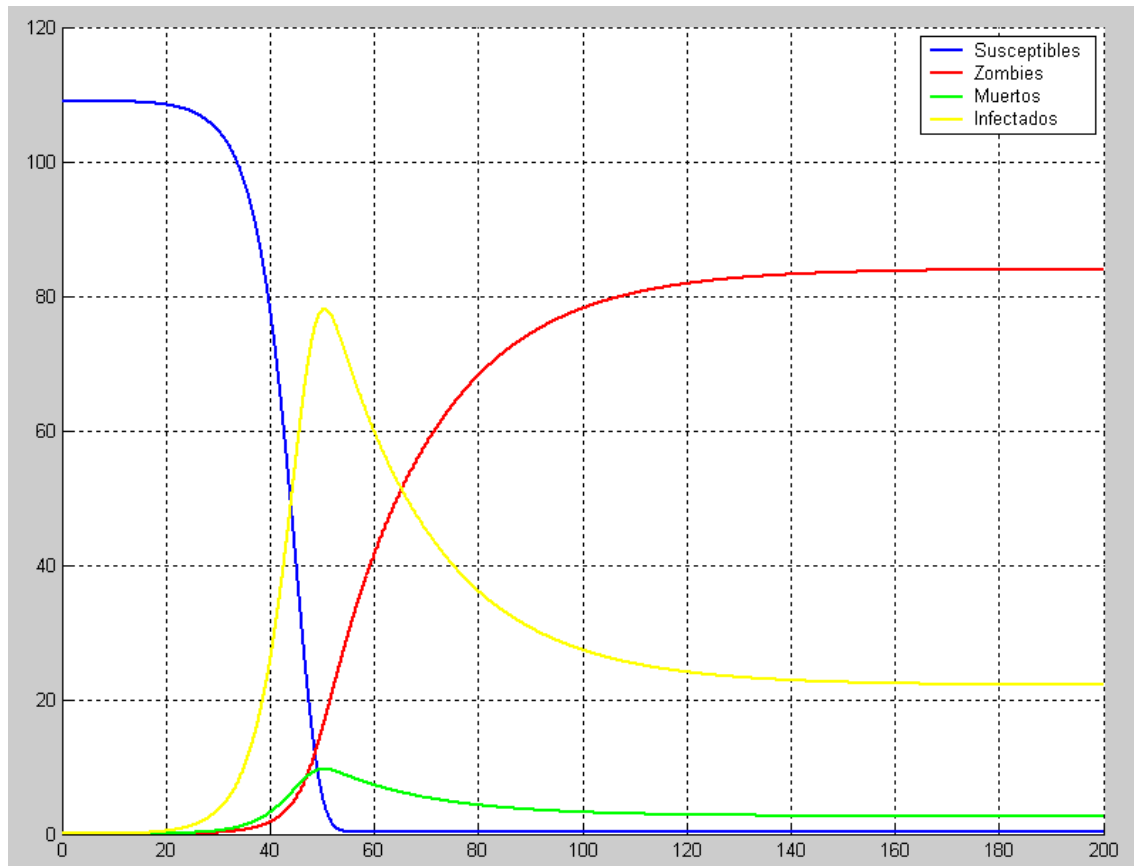
$$\frac{dZ}{dt} = \rho I + \eta R - \alpha SZ - cZ$$

$$\frac{dR}{dt} = \delta S + \delta I + \alpha SZ - \eta R$$

Para dar valores a estos parámetros podemos usar los mismo del artículo base[1] que estamos usando, pero antes tenemos que adaptar el anunciado de sus parámetros para adaptarlo a este caso real, en este caso solo queda por adaptar el parámetro C, que representa la cantidad de zombis curados que vuelven a estado susceptible, tal que:

$c$  : representa la cantidad de personas infectadas por la Polio curados y que vuelven a estado susceptible.

Para dar valor  $c$  , como antes explicamos, supondremos que diariamente se curan 1% de las personas infectadas, ya que es difícil encontrar un infectado con síntomas en un instante de tiempo, ya que el 95% de los casos son asintomáticos, por tanto  $c = 0,01$ .



**Figura 3.5** Modelo de Munz con Cura adaptado a la epidemia de Polio en Canadá.  
Fuente: Propia.

El número de Susceptibles se mantiene muy bajo y pasa exactamente lo mismo que en el modelo de Cuarentena, los infectados son muy elevados y continuaran creando “Zombis”. Esto da a entender que solo una vacuna universal en la población es capaz de salvar a los habitantes.

### 3.6 MODELO DE ERRADICACIÓN IMPULSIVA

En este modelo como ya se ha explicado, se trata de controlar la epidemia de una forma más agresiva, se recurre a ataques estratégicos para destruir la población zombi siempre que nuestros recursos lo permitan.

El modelo queda descrito por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dS}{dt} = \Pi - \beta SZ - \delta S \quad t \neq tn$$

$$\frac{dZ}{dt} = \beta SZ + \theta R - \alpha SZ \quad t \neq tn$$

$$\frac{dR}{dt} = \delta S + \alpha SZ - \theta R \quad t \neq tn$$

$$\Delta Z = -\kappa n Z \quad t = tn'$$

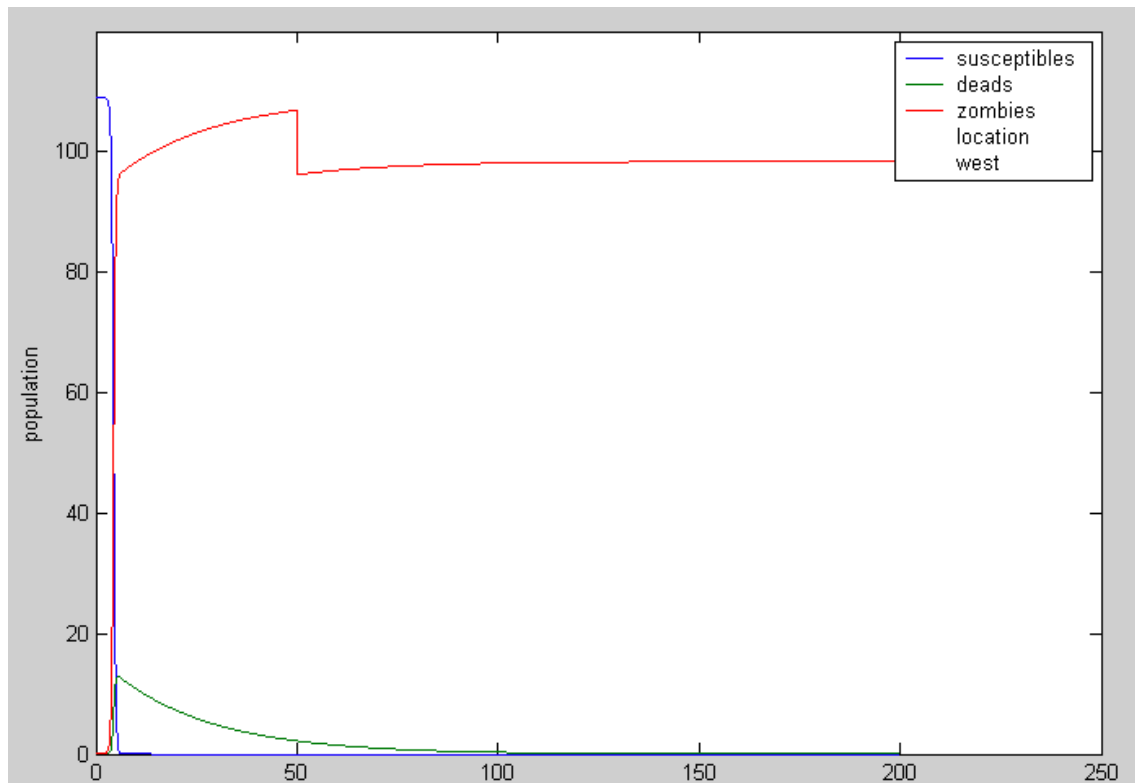
Donde  $\kappa$  es la proporción de matanza, es decir, la proporción de zombies del total que morirán en cada ataque y  $n$  indica el número de ataques necesarios hasta obtener  $\kappa n > 1$ .

Adaptaremos estos los anunciados del modelo original a la realidad de una manera un tanto peculiar:

Mataremos a las personas infectadas en las incursiones diarias ya que, a diferencia de una epidemia zombi en un mundo apocalíptico, la realidad en Canadá en 1933 no era tal y los recursos y la coordinación necesaria para cumplir este objetivo era elevada.

La proporción de matanza sería 0,01, ya que lo complicado no sería matar a un infectado, si no detectar un infectado, no seremos tan exagerados en matar a cualquier sospecha de infección.

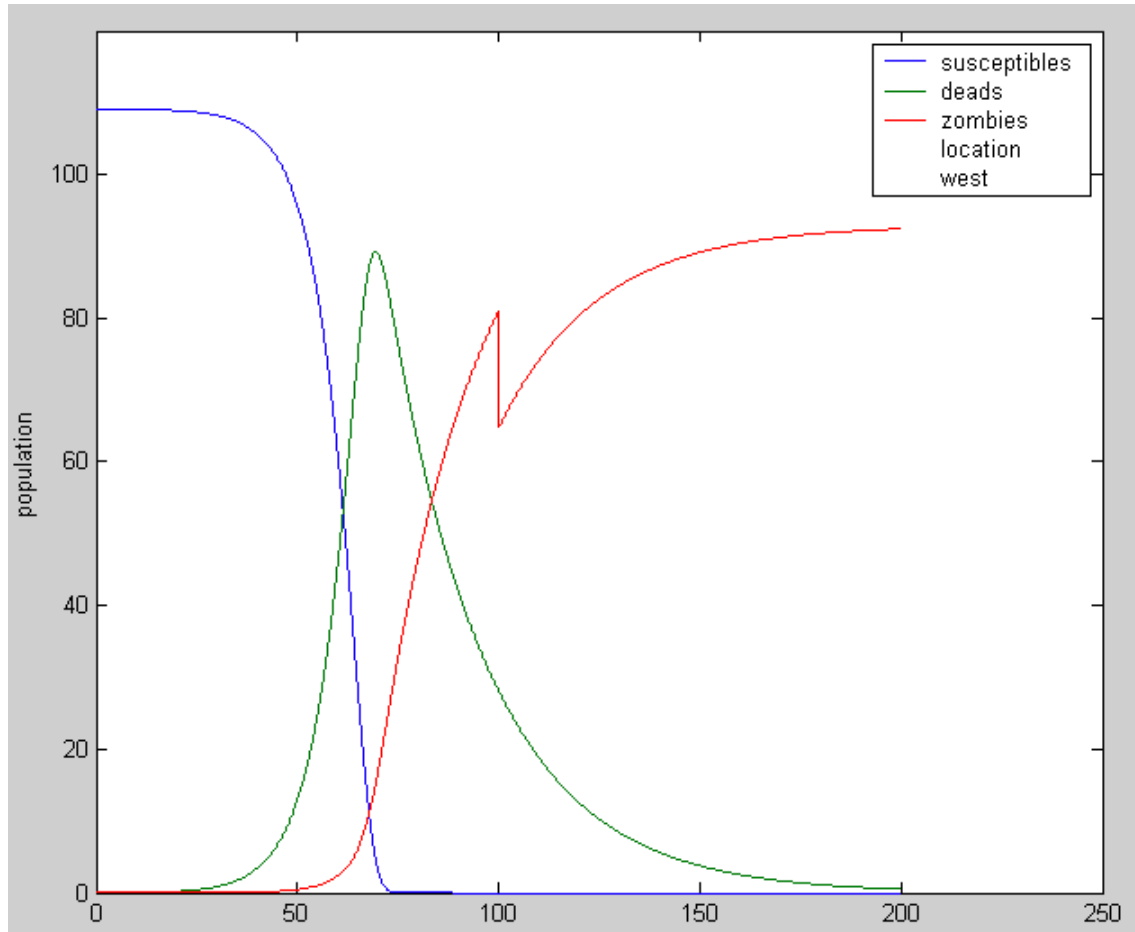
Proponemos para la simulación un ataque cada 50 días,  $N_{raid} = 4$ .



**Figura 3.6** Modelo de Munz de Erradicación Impulsiva a la epidemia de Polio en Canadá,  $\alpha = 0,005$ .

Fuente: Propia.

Vemos que los susceptibles se verían derrotados a los pocos días de iniciarse la epidemia, esto en gran parte por que estamos usando  $\alpha = 0,005$ ; este valor para un modelo donde los Susceptibles deciden enfrentarlo es muy bajo, usando un valor de  $\alpha = 0,05$  ya más realista y menos pesimista obtenemos los siguientes resultados.



**Figura 3.7** Modelo de Munz de Erradicación Impulsiva a la epidemia de Polio en Canadá,  $\alpha = 0,05$ .  
Fuente: Propia.

Como vemos los Susceptibles serían igualmente derrotados, pero durarían más días, cerca de 75 días.

### 3.7 CONCLUSIONES

Vemos que resulta difícil encontrar una relación directa con una infección real con los modelos de Munz, los cuales modelan una infección del mundo de la ficción y tan peculiar como es la Zombi, pero podemos encontrar conclusiones que nos acercan a la realidad.

Como muchas otras infecciones víricas, ya sea por la complicación en encontrar cura efectiva o por mejor control de la infección entre los pacientes, el uso de vacunas es la forma más eficaz para erradicar una enfermedad contagiosa.

Los modelos de Munz resultan demasiado pesimistas, los humanos pierden, dado que da un poder de propagación muy potente al virus, poder que solo han tenido por “suerte” pocas epidemias en la historia, pero nos puede dar una idea del comportamiento en el peor de los casos de una infección

## 4 MODELO DE MUNZ MEJORADO

En marzo de 2011, tres profesores de matemáticas (Hans Petter Langtangen, Kent-Andre Mardal and Pal Røtnes), de la universidad de Oslo en Noruega, publicaron un artículo titulado *Escaping the Zombi Threat by Mathematics* [10], que traducido sería: *Escapando de la amenaza Zombi con las Matemáticas*. A lo largo de este capítulo haremos continuas referencias al mismo.

El artículo es ameno de leer, empieza tratando el tema con otros modelos matemáticos, con los cuales el ser humano pudo entender mejor el mundo que le rodea e incluso predecir el futuro de alguna manera o al menos encaminarlo mejor.

Después de esta pequeña introducción, cita la importancia que tendría por lo tanto un buen modelaje matemático para lo que podría ser una epidemia zombi en un mundo “realista”.

En este capítulo vamos a explicar el funcionamiento del modelo que plantean (modelo para la interacción humano-zombi, basado en el modelo de Munz), a la vez que lo simularemos para observar las diferencias en las distantes fases de la epidemia con los valores que ellos plantean, usaremos el código Matlab que ellos mismos diseñaron para las pruebas. De esto obtendremos nuestras propias conclusiones, críticas y posibles mejoras.

## 4.1 MODELO PARA LA INTERACCIÓN HUMANO-ZOMBI

Para su modelo matemático los profesores noruegos [10] plantearon los siguientes grupos, también cogieron como base Munz:

S: Humanos susceptibles, quienes pueden convertirse en Zombis.

I: Humanos infectados, que han sido mordidos por un Zombi.

Z: Zombis

R: Retirados, Zombis que han sido asesinados o humanos muertos.

Para este modelo plantean las siguientes ecuaciones:

$$S^{i+1} = S^i + \Delta t(\sum - \beta S^i Z^i - \delta_s S^i)$$

$$I^{i+1} = I^i + \Delta t(\beta S^i Z^i - \rho I^i - \delta_i I^i)$$

$$Z^{i+1} = Z^i + \Delta t(\rho I^i - (\alpha + \omega(t))S^i Z^i + \zeta R^i)$$

$$* \omega(t) = a \sum_{i=0}^m \exp\left(\frac{1}{2} \left(\frac{t - T_i}{\sigma}\right)^2\right)$$

$$R^{i+1} = R^i + \Delta t(\delta_s S^i + \delta_i I^i - \zeta R^i + (\alpha + \omega(t))S^i Z^i)$$

En estas ecuaciones nos encontramos los siguientes parámetros:

•  $\sum$  : Representa la cantidad de humanos nuevos traídos al área “zombificada” por unidad de tiempo.

•  $\beta$  : Representa la probabilidad teórica de que un humano y un zombi se encuentren físicamente, durante un intervalo de tiempo, con el resultado de que el humano quede infectado.

•  $\delta_s$  : Representa la probabilidad de que un humano sea asesinado o muera, en un intervalo de tiempo.

•  $\delta_i$  : Representa la probabilidad de que un humano infectado sea asesinado o muera, en un intervalo de tiempo.

•  $\rho$  : Representa la probabilidad de que un humano infectado se convierta en un zombi, durante un intervalo de tiempo.

•  $\zeta$  : Representa la probabilidad de que un individuo eliminado se convierta en un zombi, durante un intervalo de tiempo.

•  $\alpha$  : Representa la probabilidad de que, durante un intervalo de tiempo, en un



enfrentamiento entre un humano y un zombi, el humano mate al zombi.

•  $\alpha$  : Como  $\alpha$  , pero la probabilidad se relaciona con matar a un zombi de una manera organizada y en una guerra efectiva contra zombis.

•  $T_0, \dots, T_m$  : Puntos en el tiempo con fuertes ataques (guerra) a los zombis.

•  $\sigma$  : Duración de los ataques en la guerra contra los zombis.

Hay que tener en cuenta que las probabilidades por unidad de tiempo no se encuentran necesariamente en el intervalo  $[0, 1]$  La probabilidad real, que se encuentra entre 0 y 1, surge después de la multiplicación por el intervalo de tiempo de interés.

Desarrollando las ecuaciones anteriores, con límite  $\Delta t \rightarrow 0$  , se obtiene un sistema similar al anterior, este sistema es el que se usará para hacer las pruebas:

$$S' = -\beta SZ - \delta_s S$$

$$I' = \beta SZ - \rho I - \delta_I I$$

$$Z' = \rho I - (\alpha + \omega(t))SZ + \zeta R$$

$$* \omega(t) = a \sum_{i=0}^m \exp \left( \frac{1}{2} \left( \frac{t - T_i}{\sigma} \right)^2 \right)$$

$$R' = \delta_s S + \delta_I I - \zeta R + (\alpha + \omega(t))SZ$$

#### Estimación de Parámetros

Para estimar los parámetros y hacerlo más realista, en el artículo dividen en tres fases la epidemia Zombi, para ello se basaron en la película "The Night of The Living Dead".

1. Fase Inicial
2. Fase de Histeria
3. Fase de Contra ataque

#### • Fase Inicial

Esta fase se caracteriza por el hecho de que los humanos no saben que los Zombis son devoradores de personas e incluso intentan curarlos en los hospitales, esto hace que en esta fase la enfermedad se propague más rápidamente y pocos Zombis sean asesinados.

Para esta fase inicial en el artículo dan los siguientes valores para representar lo anteriormente dicho:

## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa Edson Flores Rosales

$$\Sigma = 20$$

$$\beta = 0.03$$

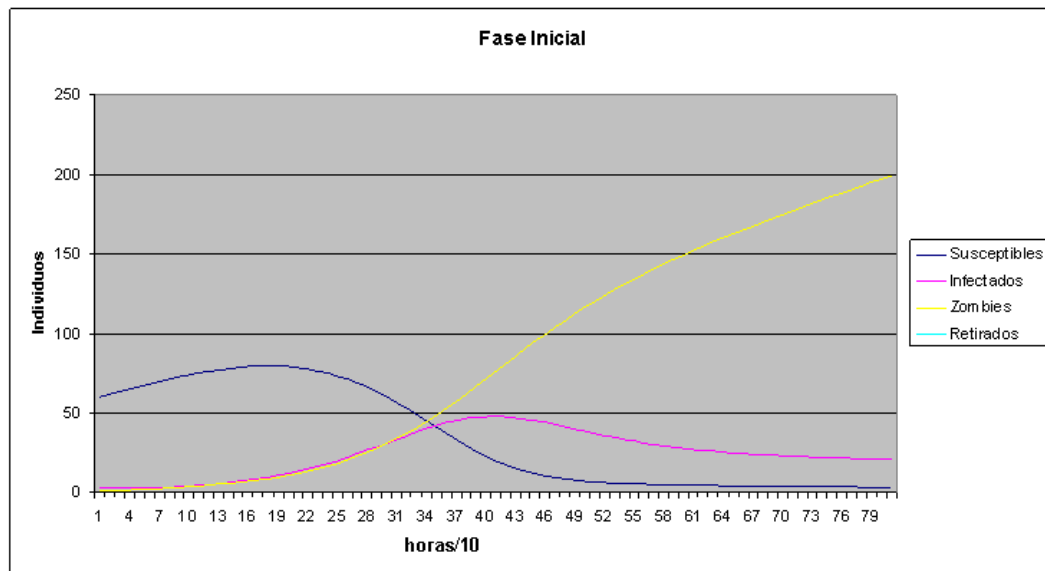
$$S^0 = 60$$

$$Z^0 = 1$$

$$I^0 = 3$$

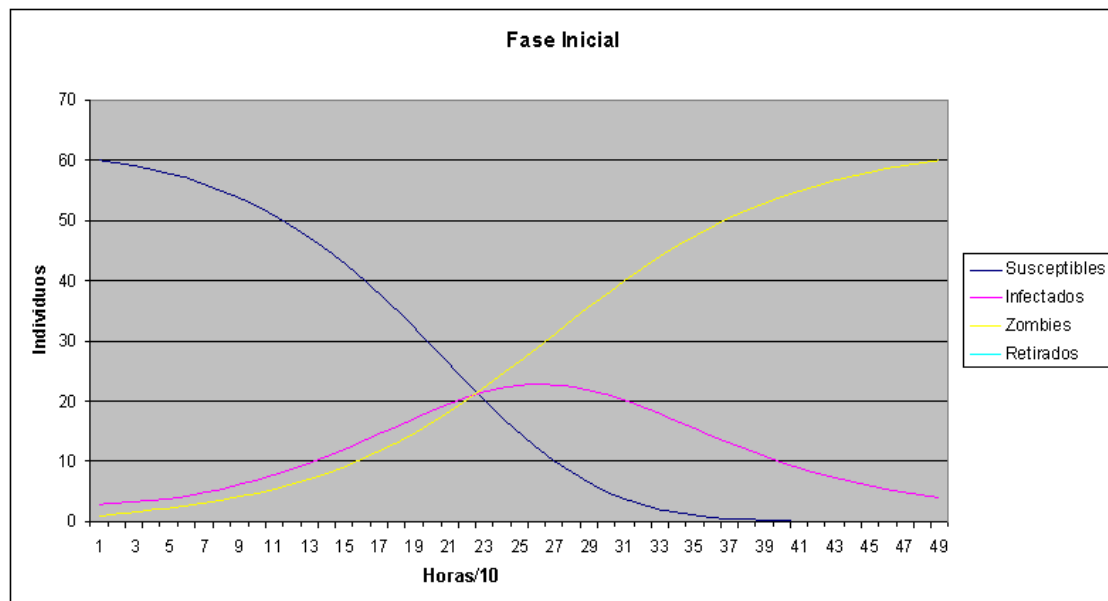
$$\rho = 1$$

$$\alpha = a = 0$$



**Figura 4.1** Fase inicial del modelo con  $\beta = 0.03$  . Fuente: propia

Para dar estos valores, previamente hicieron una prueba con  $\beta = 0.0625$  , donde obtuvieron la siguiente gráfica.



**Figura 4.2** Fase inicial del modelo con  $\beta = 0.0625$  . Fuente: propia

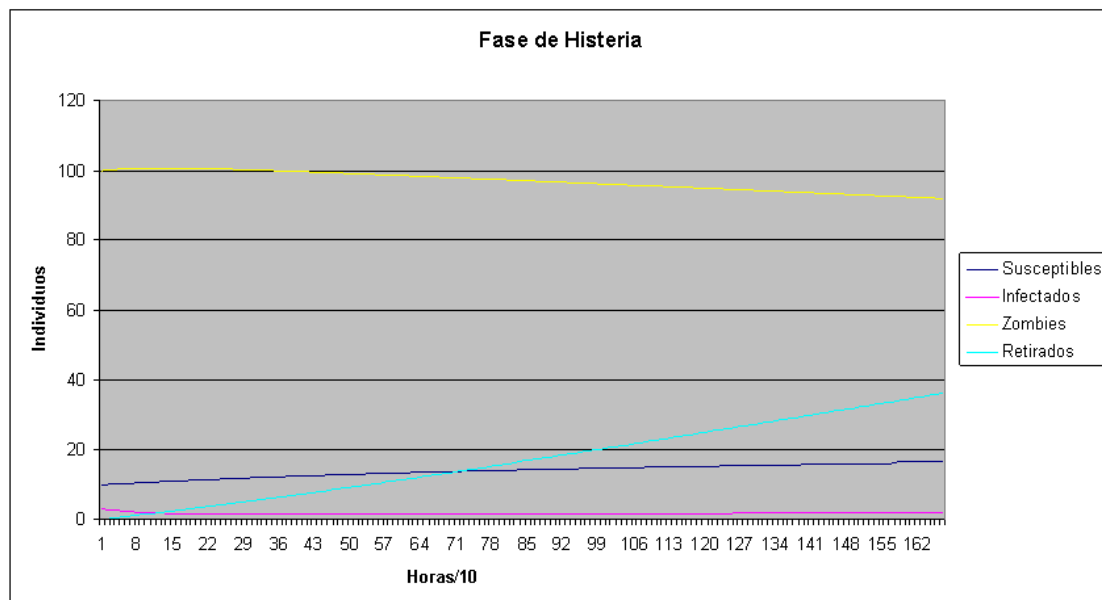
Observamos en la anterior gráfica que con  $\Sigma = 0$  y  $\beta = 0.0625$  , los humanos serían

casi exterminados en algo más de 3 horas, por lo que les pareció más realista poner una  $\beta = 0.03$  y  $\Sigma = 20$ , para lo que se puede luego observar en las siguientes fases de las películas. Con esto los autores del artículo quieren resaltar la importancia del valor de  $\beta$ . Dado que un valor muy alto extinguiría a los humanos antes de que acabara la película.

#### • Fase de Histeria

Esta fase está caracterizada en que los humanos se enfrentan a una situación ajustada e intentan luchar contra con los Zombis con medios muy simples. Dado que en esta fase también los humanos tienden más a esconderse, la “zombificación” es más lenta. Para esta fase de histeria en el artículo dan los siguientes valores para representar lo anteriormente dicho:

$$\begin{aligned}\Sigma &= 2 \\ \beta &= 0.0012 \\ \delta_I &= 0.014 \\ \rho &= 1 \\ \alpha &= 0.0016 \\ S &= 10 \\ Z &= 100 \\ \Delta t &= 24\end{aligned}$$



**Figura 4.3** Fase de Histeria del modelo, la mayor parte de individuos son Zombis. Fuente: Propia.

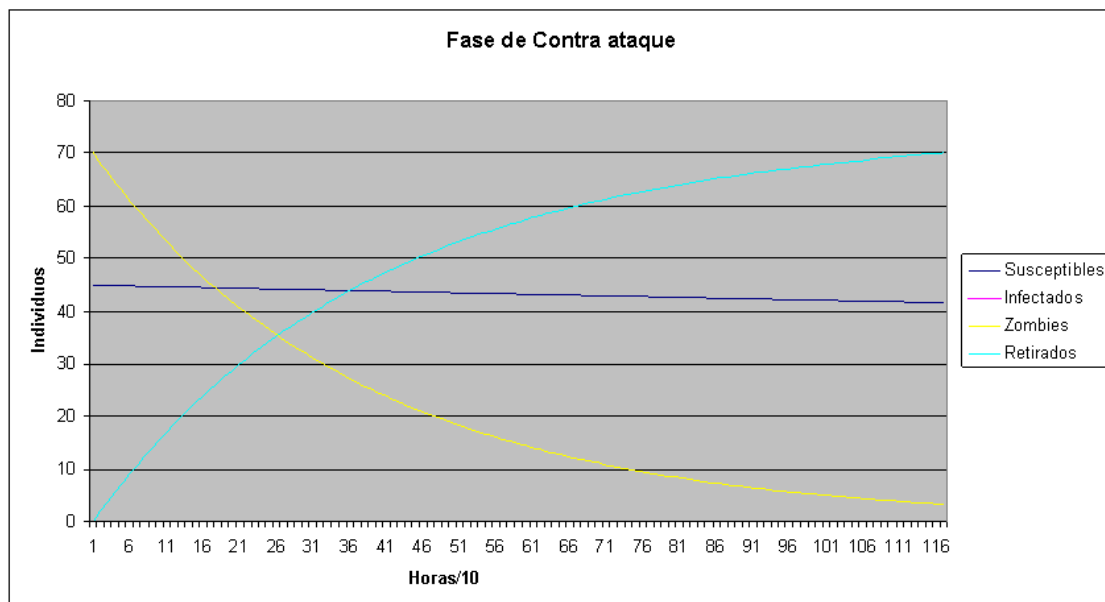
Vemos que en esta fase los Susceptibles y los Zombis “conviven”, ya que al empezar a defenderse los Susceptibles detienen el crecimiento de los Zombis.

### • Fase de Contra ataque

En esta fase final, los humanos se han dado cuenta que la amenaza real que supone la epidemia, por lo que estos empiezan a armarse y atacar los Zombis de forma estratégica. Pese a la reacción de los humanos, resulta difícil atacar a los Zombis, ya que en los Zombis a menudo superan en número al humano debido a que en la fase inicial los Zombis se expandieron muy deprisa.

Para esta fase de contra ataque en el artículo dan los siguientes valores para representar lo anteriormente dicho:

$$\begin{aligned}\Sigma &= 0 \\ \beta &= 0 \\ \delta_I &= 0 \\ \delta_S &= 0.0067 \\ \rho &= 1 \\ \alpha &= 0.006 \\ S &= 45 \\ Z &= 70 \\ \Delta t &= 24\end{aligned}$$



**Figura 4.4** Fase de contra ataque del modelo, se observa una disminución de los Zombis. Fuente: Propia.

Como se puede observar en la gráfica los autores suponen que no habría más infectados en esta fase.

Para dar estos valores los autores fueron menos pesimistas, ya que en la fase inicial propusieron una “zombificación” rápida.

También proponen una idea más realista, donde la guerra contra los Zombis comienza mucho antes con ataques continuos por parte de los Susceptibles a los Zombis como propuso Munz et al.

La función  $\omega(t)$  propone justamente esto, al principio la “zombificación” es rápida  $\beta = 0.03125$ , pero los humanos imponen resistencia  $\alpha = 0.2\beta$ ,  $a = 10\beta$  y los ataques

son continuos, cada dos horas,  $\sigma = 0.5$ .

Para simular esta “guerra” desde el inicio proponen los siguientes valores:

$$\beta = 0.03125$$

$$\delta_I = \delta_S = \zeta = \Sigma = 0$$

$$\rho = 1$$

$$\alpha = 0.2\beta$$

$$a = 10\beta$$

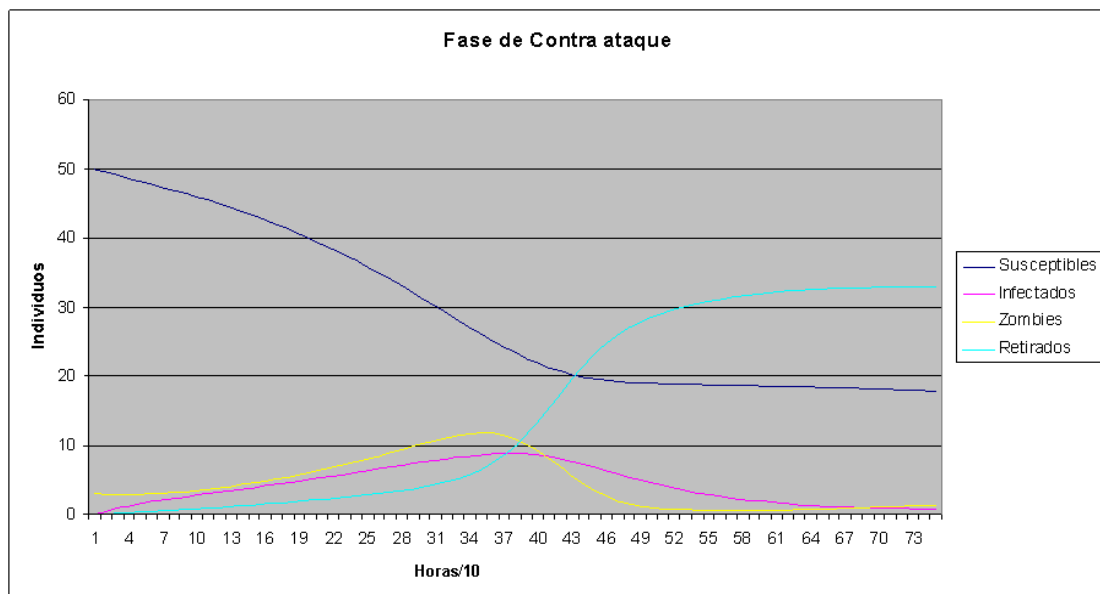
$$S = 50$$

$$I = 0$$

$$Z = 3$$

$$\sigma = 0.5$$

Ataques: a las 5, 10 y 18 horas.



**Figura 4.5** Fase de Contra ataque, iniciada más pronto, la propagación de los Zombis es baja. Fuente: Propia.

Con esto llegan a la conclusión que la fase Inicial de la película no es realista y que la “zombificación” no puede ir tan rápida ya que los humanos se darán cuenta pronto del peligro y se impondrán lo antes posible a la amenaza. Por lo tanto los Zombis no deberían ser una amenaza para la humanidad, salvo que  $\zeta > 0$ .

## 4.2 CONCLUSIONES DEL MODELO MEJORADO

### 4.2.1 CONCLUSIONES DEL AUTOR

Los zombis no son tan inteligentes ni los humanos tan “inocentes”, por lo que la zombificación no sería tan rápida, los humanos plantearíamos cara rápidamente a la amenaza y como se vería en otros ejemplos películas el humano sería mucho más efectivo a la hora de causar bajas en Zombis que, al contrario.

Por lo que la amenaza Zombi no sería tal como la película que tomaron los autores como ejemplo, a menos que se dé  $\zeta > 0$ .

## **4.2.2 CONCLUSIONES PROPIAS, CRÍTICAS Y POSIBLES MEJORAS**

A modo de conclusión, podemos pensar que el modelo que plantea el autor es muy completo, pero queda limitado por los grupos iniciales que plantea Munz en sus ecuaciones:

S: Humanos susceptibles, quienes pueden convertirse en Zombis.

I: Humanos infectados, que han sido mordidos por un Zombi.

Z: Zombis.

R: Retirados, Zombis que han sido asesinados o humanos muertos.

Estos grupos se podrían analizar de mejor forma, teniendo a mano un estudio de la población donde la epidemia Zombi se desarrollaría. Para ello pondremos de ejemplo el estado español y otros países, haciendo un análisis de su población, podremos ver cómo mejorar o modificar los grupos iniciales que plantea Munz, que son los mismos que usa el autor del artículo que estamos analizando.

Con un correcto análisis de población podemos estimar mejor el rango de edades que sobrevivirían a lo largo de la epidemia.

## **4.2.3 APLICACIÓN DE LA MEJORA DEL NUEVO MODELO EN POBLACIONES**

Atendiendo las conclusiones anteriores, tomaremos el estado español para analizar de mejor forma los grupos de Humanos Susceptibles, Infectados, Zombis y Retirados, subgrupos planteados inicialmente por Munz.

De tal forma que añadiremos a las ecuaciones valores que diferencien estos subgrupos y observaremos como estos subgrupos evolucionan de forma diferente según avanza la posible epidemia Zombi, por lo que representaría una mejora de [10].

### 4.2.3.1 APLICACIÓN DE LA MEJORA DEL NUEVO MODELO EN LA POBLACIÓN ESPAÑOLA

Análisis demográfico de España

Año	Población absoluta	Variación
2000	40 470 182	+100 515
2001	40 665 545	+195 363
2002	41 035 271	+369 726
2003	41 827 836	+792 565
2004	42 547 454	+719 618
2005	43 296 335	+748 881
2006	44 009 969	+713 634
2007	44 784 659	+774 690
2008	45 668 938	+884 279
2009	46 239 271	+570 333
2010	46 486 621	+247 350
2011	46 667 175	+180 554
2012	46 818 216	+151 041
2013	46 727 890	- 90 326
2014	46 512 199	-215 691
2015	46 449 565	- 62 639
2016	46 440 099	- 9 466
2017	46 527 039	+ 86 940
2018	46 659 302	+132 263

**Tabla 4.1** Evolución población española. Fuente:[11].

Vemos que actualmente en el año 2018 en España hay 46.659.302 millones de habitantes con una variación de +132.263 habitantes respecto al 2017.

De estos 46.569.302 millones habitantes, podemos observar en la siguiente tabla los grupos de edad en los que se divide:

Distribución por edad de la población española (2018) <sup>13</sup>	
Grupo de edad	%
0 a 14 años	14,83%
15 a 29 años	15,19%
30 a 44 años	22,53%
45 a 59 años	22,59%
60 a 74 años	15,44%
75 años y más	9,41%

**Tabla 4.2** Población España por edad. Fuente: [11].

Observamos que la gran mayoría de la población se encuentra entre la edad de 30 y 59

años, un 45,12% de la población, también podemos observar que menores de 14 años y mayores de 60 años conforman un 39,38%, mientras que el resto, personas de entre 15 y 29 años son un 15,19% del total de la población.

Por lo que aproximando, podríamos considerar, por grupos de edad:

Grupo de edad	Población
De 0 a 14 años y mayores de 60 años.	18.374.433 habitantes
De 15 a 29 años	7.087.547 habitantes
De 30 a 59 años	21.052.677 habitantes

**Tabla 4.3** *Tabla de grupos de edad en España. Fuente: [11].*

Ciñéndonos a nuestro análisis podemos afirmar que, si ocurriera una epidemia Zombi en España, tomando como ejemplo un número inicial de 10 Zombis, habrían 46.659.292 Susceptibles, donde:

- Aproximadamente 18.374.433 Susceptibles tendrán muy pocas o casi nulas capacidades de “vencer” a un Zombi, los llamaremos susceptibles clase A
- Aproximadamente 7.087.547 Susceptibles tendrán una capacidad muy alta de “vencer” a un Zombi, los llamaremos susceptibles clase B
- Aproximadamente 21.052.677 Susceptibles tendrán una capacidad media de “vencer” a un Zombi, los llamaremos susceptibles clase C

Después de esta aclaración, empezamos a entender la necesidad de subdividir al grupo de Susceptibles por sus posibilidades de supervivencia en un encuentro con un Zombi. Hilando algo más fino podemos analizar casos especiales de personas, como las personas que sufren discapacidad o personas que forman parte del cuerpo de defensa español.

El censo oficial sobre personas con discapacidad en España el año 2017 estima que hay unos 3,84 millones de discapacitados [12].

Consideraremos este grupo de personas con una capacidad nula de supervivencia ante un encuentro con un Zombi, los discapacitados se encuentran en una edad de entre 15 y 59 años son un 60% aprox., podemos restarlos de clase B y C, y los sumaremos a la clase A.

Grupo de edad	Población
De 0 a 14 años y mayores de 60 años.	20.678.433 habitantes
De 15 a 29 años	5.935.547 habitantes
De 30 a 59 años	19.900.677 habitantes

**Tabla 4.4** *Tabla de grupos de edad en España, considerando discapacitados. Fuente: [11].*



Ahora vamos a analizar la población con preparación militar o similar del estado español, este grupo formará otro subgrupo de Susceptibles, un Zombi que se encuentre con este subgrupo de Susceptibles tendrá nula capacidad de infectarlo o matarlo.

En España la Fuerzas Armadas, formada por el Ejército de Tierra, Aire, Armada, Cuerpos Comunes, Guardia Real y UME, están formadas por 142.000 militares mayores de 18 años y 12.000 reservas voluntarios [13].

En España existen varios cuerpos policiales, pero para este estudio solo tendremos en cuenta el más importante, el CPN, el Cuerpo Nacional de Policía que cuenta a fecha del 31 de octubre de 2017 con 64.763 agentes, también mayores de 18 años [14]. Por lo que la tabla de Susceptibles quedaría de la siguiente manera:

Clase Susceptible	Población	Probabilidad de victoria
A	20.678.433 habitantes	Muy Baja
B	5.903.166 habitantes	Media
C	19.868.296 habitantes	Baja
D	218.763 habitantes	Muy Alta

**Tabla 4.5** Tabla de grupos de Susceptible en España. Fuente: Propia.

De esta manera ya podemos distinguir dentro del grupo de Susceptibles, otros subgrupos, que nos ayudara a analizar mejor el entorno si se diera una epidemia Zombi en España

Ahora bien en cuento al grupo de Zombis también podemos hacer subdivisiones, para analizar estos habrá que hacer suposiciones sobre el origen o “supervivencia de estos” (teniendo siempre en cuenta que  $\zeta = 0$ .), como indicaremos a continuación:

- El origen de un Zombi puede ser por contagio a un Susceptible, de forma “limpia”, donde un Zombi muerde a otro Susceptible y este se convierte en Zombi. Este nuevo Zombi tendrá una capacidad elevada de contagio.
- El origen de un Zombi puede ser por contagio a un Susceptible, pero no de forma “limpia”, donde un Zombi muerde a otro Susceptible y este se convierte en Zombi, si no que el Susceptible en el intento de defenderse pierde alguna extremidad y por lo tanto el nuevo Zombi tendrá una capacidad de contagio menor.
- Un Zombi después haber tenido un encuentro con un Susceptible y “vencer”, este Zombi sale mal parado, con alguna extremidad menos como pierna o brazos por lo que tendrá menos capacidad de contagiar a un Susceptible.

Atendiendo a las tres situaciones anteriores podemos definir que existirán dos clases de Zombi, los que no les faltara ninguna extremidad y tendrán más poder de contagio y los que sí:

Clase Zombi	Probabilidad de Victoria	Falta Extremidades
Z	Alta	No
K	Baja	Si

**Tabla 4.6** Tabla de grupos de Zombis. Fuente: Propia.

En cuanto al grupo de Retirados no existe ninguna consideración relevante para poder

hacer algún tipo de análisis.

Estos subgrupos nos servirán para analizar mejor la evolución del contagio por las diferentes etapas que explica el autor, ya que entraran en juego de distinta forma:

#### • Fase Inicial

En esta fase tendremos en cuenta sobre todo los Susceptibles de clase A, B y C, observaremos cómo evolucionan según pasa el tiempo durante la epidemia Zombi. En cuanto al grupo de Zombis, solo tendremos en cuenta los Zombis de clase Z.

$$\Sigma = 0$$

$$\beta a = 0.11$$

$$\beta b = 0.056$$

$$\beta c = 0.093$$

$$S^0 a = 20$$

$$S^0 b = 5$$

$$S^0 c = 19$$

$$Z^0 = 0.000003$$

$$I^0 a = 0.000001$$

$$I^0 b = 0.000001$$

$$I^0 c = 0.000001$$

$$\rho = 1$$

$$\alpha = a = 0$$

Usando las ecuaciones:

$$S' a = \Sigma - \beta a * S a * Z - \delta_s * S a$$

$$S' b = \Sigma - \beta b * S b * Z - \delta_s * S b$$

$$S' c = \Sigma - \beta c * S c * Z - \delta_s * S c$$

$$I' a = \beta a * S a * Z - \rho * I a - \delta_I * I a$$

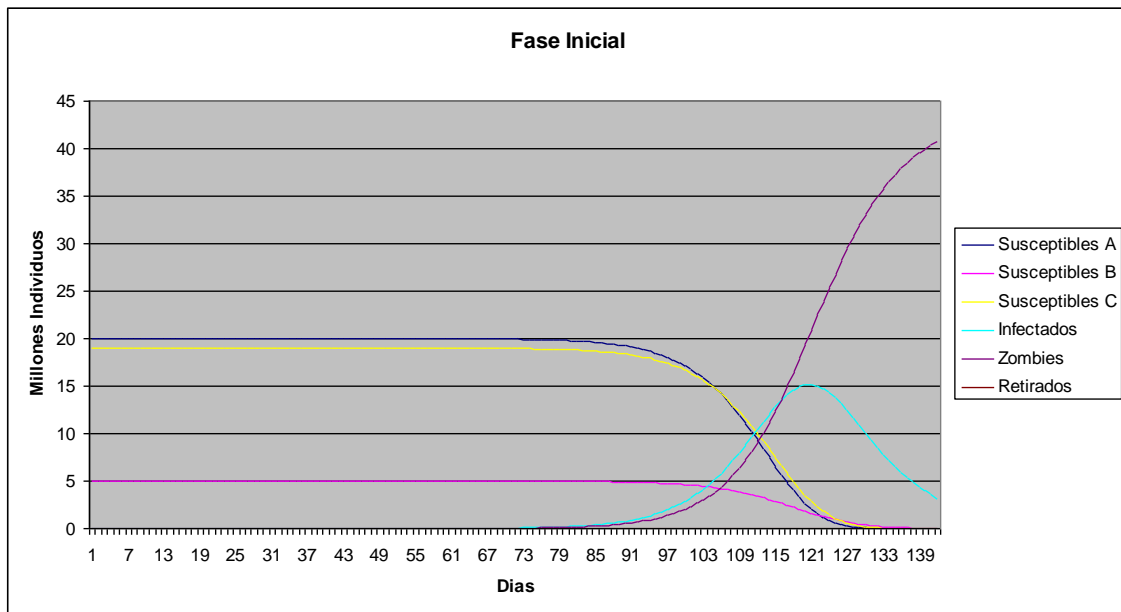
$$I' b = \beta b * S b * Z - \rho * I b - \delta_I * I b$$

$$I' c = \beta c * S c * Z - \rho * I c - \delta_I * I c$$

$$Z' = \rho I - (\alpha) S Z + \zeta R$$

$$R' = \delta_s S + \delta_I I - \zeta R + (\alpha) * S Z$$

Obtenemos el siguiente gráfico:



**Figura 4.6** Gráfica Fase Inicial mejorada en España. Fuente: Propia.

En el gráfico podemos observar que a partir del día 130 prácticamente no quedan susceptibles, en base a los datos podemos afirmar que en el día 160 prácticamente solo quedan Susceptibles de clase B, los de clase A y C a pesar de ser mayoritarios son “derrotados” muy rápidamente y casi inexistentes. También vemos que aproximadamente en el día 110 el número de Zombies es mayor al número de Susceptibles de clase A y B, y el día 105 ya es superior al grupo B.

#### • Fase de Histeria

Esta fase para que sea más realista, empezara en nuestro ejemplo a partir del día 167 de la epidemia, cuando el número de Susceptibles del grupo A y C prácticamente han desaparecido, solo quedan del grupo B.

En esta fase ya supondremos Zombies de clase K y clase Z, ya que los susceptibles de clase B al empezar a defenderse, los de clase K serán más fácil de derrotar. Supondremos que un 70% inicialmente son de clase Z y 30% de clase K. Los infectados se suman.

$$\Sigma = 0$$

$$\delta_l = 0.014$$

$$\beta b = 0.0012$$

$$S^0 b = 0.00012$$

$$Z^0 z = 28.7$$

$$Z^0 k = 12.6$$

$$I^0 a = 0.148$$

$$I^0 b = 0.08$$

$$I^0 c = 0.167$$

## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa Edson Flores Rosales

$$\rho = 1$$

$$\alpha_z = 0.0016$$

$$\alpha_k = 0.0008$$

Usando las ecuaciones:

$$S'_{bz} = \sum -\beta b * Sb_z * Z_z - \delta_s * Sb_z$$

$$S'_{bk} = \sum -\beta b * Sb_k * Z_k - \delta_s * Sb_k$$

$$I' = \beta b * Sb * Z - \rho * I_c - \delta_i * I$$

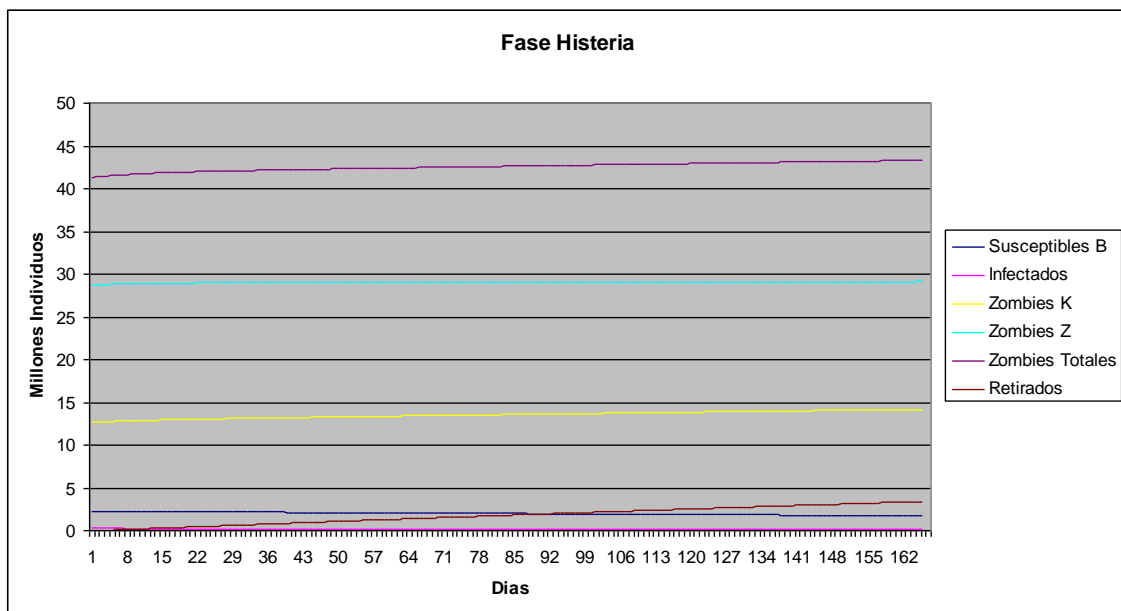
$$Z'_z = \rho I - (\alpha_z)SZ_z + \zeta R$$

$$Z'_k = \rho I - (\alpha_k)SZ_k + \zeta R$$

$$R'_z = \delta_s S + \delta_i I - \zeta R_z + (\alpha_z) * SZ_z$$

$$R'_k = \delta_s S + \delta_i I - \zeta R_k + (\alpha) * SZ_k$$

Obtenemos el siguiente gráfico:



**Figura 4.7** Grafica Fase Histeria mejorada en España. Fuente: Propia.

Llegados el día 167, con solo Susceptibles de clase B observamos cómo tanto Zombis y Susceptibles “conviven”, aunque también llegamos a la conclusión que es demasiado tarde en este momento, el número de Zombis es demasiado elevado y la curva de crecimiento de los Zombis tardaría mucho días en detenerse. En el artículo analizado tarda tan solo unas horas ya que trata datos mucho más pequeños.

En la gráfica no es apreciable pero el número de Susceptibles crece muy lentamente debido a la gran cantidad de Zombis.

#### • Fase de Contra ataque

En esta fase los Susceptibles de clase A se habrán extinguido por completo, de clase C quedarían muy pocos y los Susceptibles de clase B se mantendrían aún bastante supervivientes, pero ahora ya entrarían en juego los Susceptibles de clase D, la aparición de este grupo se tendría que reflejar en las gráficas y ver como los Zombis de clase K se reducen de una forma muy rápida, de la misma manera que los de clase Z. Ahora los Susceptibles de clase B, los supervivientes no se tienen en cuenta y los grupos de Zombis se agrupan en uno solo, ya que la posibilidad de contagio a unos Susceptibles de clase D no será posible.

$$\Sigma = 0$$

$$\beta = 0$$

$$\delta_I = 0$$

$$\rho = 1$$

$$\alpha = 0.95$$

$$S^0 D = 0.3$$

$$Z^0 = 42$$

Usando las siguientes ecuaciones:

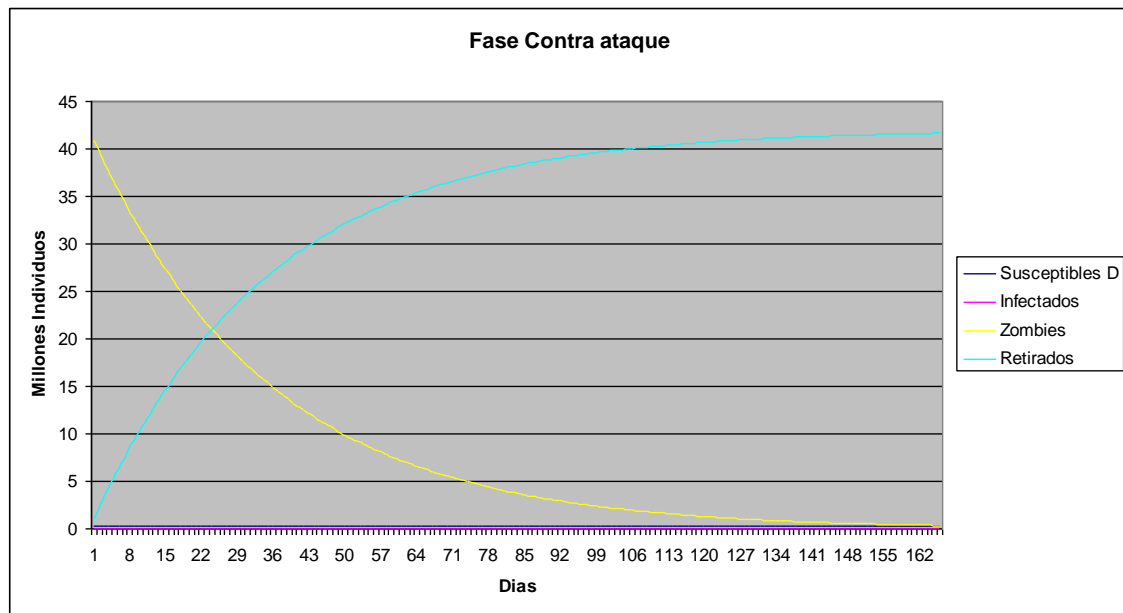
$$Sd' = \Sigma - \beta SdZ - \delta_S Sd$$

$$I' = \beta SdZ - \rho I - \delta_I I$$

$$Z' = \rho I - (\alpha) SdZ + \zeta R$$

$$R' = \delta_S Sd + \delta_I I - \zeta R + (\alpha) SZ$$

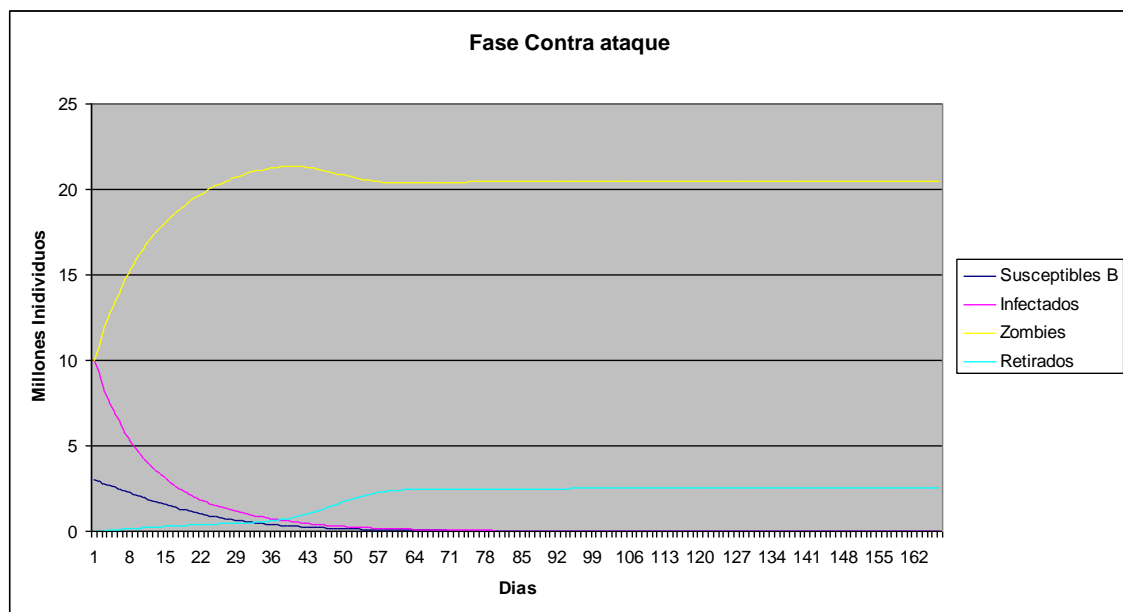
Obtenemos el siguiente gráfico:



**Figura 4.8** Grafica Fase Contra Ataque mejorada en España. Fuente: Propia.

Llegados a este punto las fuerzas españolas tardarían más de 162 días en eliminar por completo a los Zombis, unos 180 días.

Como hacen lo autores podemos simular una "guerra" mucho más pronto contra los Zombis, donde los mismos Susceptibles de clase B inician, al ser lo más capacitados se organizarían al ver como el grupo de Zombis superan en número al grupo A o C de Susceptibles, esto llega el día 112, mantenemos las variables usadas por el autor:



**Figura 4.9** Grafica Fase Contra Ataque, iniciada más pronto mejorada en España. Fuente: Propia.

Vemos que iniciando en este punto la guerra contra los Zombis, sería demasiado tarde, como hemos visto anteriormente en esta guerra solo saldrían victoriosos los Susceptibles cuando el número de Zombis es muy bajo, al inicio de la fase inicial.

Para tener más perspectivas de sobre cómo afectaría una epidemia Zombi en la realidad, podemos analizar un país muy militarizado como lo es Estados Unidos de Norte América y otro con poco poder militar como lo es Islandia, el cual no cuenta con ejército desde 1859, este país mantuvo un acuerdo de defensa con los EE.UU., desde 1951 que finalizó en septiembre de 2006. Islandia mantiene las fuerzas Pacificadoras Expedicionarias, guardacostas, policía, así como una unidad especial de policía para casos específicos.

Adrià Molina en su anterior trabajo [26], presentó también un análisis de una epidemia Zombi en España, obteniendo los siguientes resultados:

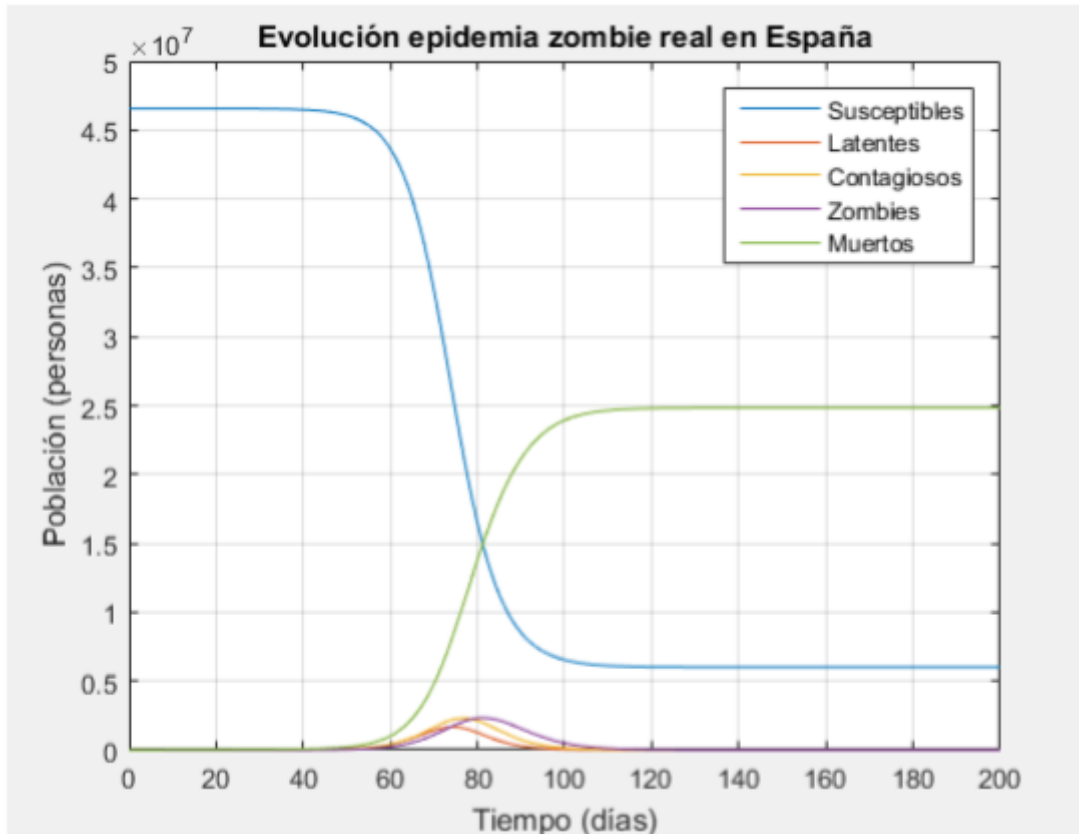


Figura 4.10 Gráfica Evolución Zombi Real en España. Fuente: [26].

El resultado al no dividir en etapas la epidemia carece de realismo, trata la epidemia como lineal, de la misma manera la población, no queda descrita por edades- condiciones y no permite una visualización del todo analítica de cómo quedaría el estado español después de una epidemia Zombi.

En común podemos observar que los resultados muestran un descenso de Susceptibles muy elevado cercano al día 100, Adrià en su gráfica [26] muestra que a partir de ahí se estabilizan los susceptibles y los Zombies empiezan a descender, este descenso es muy rápido ya que no cuentan con los diferentes factores de población y armas de España, tardan menos de 20 días mientras que en mis resultados cerca de 180 días.

Además, con estos resultados nos podemos hacer una idea de cómo quedaría la población, los supervivientes serían mayoritariamente de mediana edad, además de las fuerzas armadas.

#### 4.2.3.2 APLICACIÓN DE LA MEJORA DEL NUEVO MODELO EN LA POBLACIÓN DE ESTADOS UNIDOS

Análisis demográfico Estados Unidos

Población histórica		
Año	Pob.	±%
1790	3 929 214	—
1800	5 236 631	+33.3%
1810	7 239 881	+38.3%
1820	9 638 453	+33.1%
1830	12 866 020	+33.5%
1840	17 069 453	+32.7%
1850	23 191 876	+35.9%
1860	31 443 321	+35.6%
1870	38 558 371	+22.6%
1880	49 371 340	+28.0%
1890	62 979 766	+27.6%
1900	76 212 168	+21.0%
1910	92 228 531	+21.0%
1920	106 021 568	+15.0%
1930	123 202 660	+16.2%
1940	132 165 129	+7.3%
1950	151 325 798	+14.5%
1960	179 323 175	+18.5%
1970	203 211 926	+13.3%
1980	226 545 805	+11.5%
1990	248 709 873	+9.8%
2000	281 421 906	+13.2%
2010	308 745 538	+9.7%
2014	318 185 000	+3.1%

Tabla 4.7 Población histórica Estados Unidos. Fuente: [15].

Vemos que USA en los datos recogidos en 2014 hay 318.185.000 millones de habitantes con una variación de +3,1% con respecto al año anterior [15].

De estos 318.185.000 millones habitantes, podemos observar en la siguiente tabla los grupos de edad en los que se divide, esta tabla es del 2010 pero nos servirá para tener una idea aproximada:



Year	0–18 years	18–44 years	45–64 years	65 years and over
1940	30.6%	42.8%	19.8%	6.8%
2010	24.0%	36.5%	26.4%	13.0%

**Tabla 4.8** Grupos de edad en Estados Unidos en 2010. Fuente: [15].

Observamos que la gran mayoría de la población se encuentra entre la edad de 18 y 44 años, un 36,5% de la población, también podemos observar que menores de 18 años hay un 26,4% y mayores de 65 años conforman un 13%.

Para poder realizar mejor las comparaciones usaremos los mismos grupos de Edad que en el estado español.

Por lo que, aproximando, podríamos considerar, por grupos de edad:

Grupo de edad	Población
De 0 a 14 años y mayores de 60 años.	18,6%+13,2%=31,8% 101.182.667 habitantes
De 15 a 29 años	5,4%+15,44%=20,84% 66.309.647 habitantes
De 30 a 59 años	47,36% 150.692.174 habitantes

**Tabla 4.9.** Grupo de edad en Estados Unidos con valores absolutos. Fuente: Propia.

Ciñéndonos a nuestro análisis podemos afirmar que si ocurriera una epidemia Zombi en USA, tomando como ejemplo un número inicial de 10 Zombis, habrían 318.184.490 Susceptibles, donde podemos extrapolar:

- Aproximadamente 101.182.667 Susceptibles tendrán muy pocas o casi nulas capacidades de “vencer” a un Zombi, los llamaremos susceptibles clase A
- Aproximadamente 66.309.647 Susceptibles tendrán una capacidad muy alta de “vencer” a un Zombi, los llamaremos susceptibles clase B
- Aproximadamente 150.692.174 Susceptibles tendrán una capacidad media de “vencer” a un Zombi, los llamaremos susceptibles clase C

Hilando más fino, el censo oficial sobre personas con discapacidad en USA el año 2015 estima que hay unos 40 millones de discapacitados, el 12,6% de la población [16].

Consideraremos este grupo de personas con una capacidad nula de supervivencia ante un encuentro con un Zombi, los discapacitados que se encuentran en una edad de entre 15 y 59 años son un 51% aprox., por lo que podemos restar de clase B y C los discapacitados y los sumaremos a la clase A.

Grupo de edad	Población
De 0 a 14 años y mayores de 60 años.	121.582.667 habitantes
De 15 a 29 años	56.109.647 habitantes
De 30 a 59 años	140.492.174 habitantes

**Tabla 4.10** Grupo de edad en Estados Unidos con valores absolutos, teniendo en cuenta discapacitados.  
Fuente: Propia.

Ahora vamos a analizar la población con preparación militar o similar de Estados Unidos, este grupo formará otro subgrupo de Susceptibles, un Zombi que se encuentre con este subgrupo de Susceptibles tendrá nula capacidad de infectarlo o matarlo.

La Fuerzas Armadas de los Estados Unidos, está formada la Armada, el Cuerpo de Marines, la Guardia Costera, la Fuerza Aérea y el Ejército, con un personal activo de 1.325.000 de personas y 1.500.000 de personal de reserva [17].

A fecha de 2014, Estados Unidos cuenta con 780.000 agentes de policía, todos mayores de 18 años [18].

Por lo que la tabla de Susceptibles quedaría de la siguiente manera:

Clase Susceptible	Población	Probabilidad de victoria
A	121.582.667 habitantes	Muy Baja
B	55.719.647 habitantes	Media
C	140.102.174 habitantes	Baja
D	3.605.000 habitantes	Alta

**Tabla 4.11** Grupos de Susceptibles en Estados Unidos. Fuente: Propia.

De esta manera ya podemos distinguir dentro del grupo de Susceptibles, otros subgrupos, que nos ayudara a analizar mejor el entorno si se diera una epidemia Zombi en España

Ahora bien, en cuanto al grupo de Zombis también podemos hacer subdivisiones como hicimos ya anteriormente, habrán Zombis de clase Z y K: para analizar estos habrá que hacer suposiciones sobre el origen o "supervivencia de estos", como indicaremos a continuación:

Clase Zombi	Probabilidad de Victoria	Falta Extremidades
Z	Alta	No
K	Baja	Si

**Fuente 4.12** Grupo de Zombis Estados Unidos. Fuente: Propia.

En cuanto al grupo de Retirados no existe ninguna consideración relevante para poder hacer algún tipo de análisis.

Estos subgrupos nos servirán para analizar mejor la evolución del contagio por las diferentes etapas que explica el autor, ya que entrarán en juego de distinta forma:

• **Fase Inicial**

$$\Sigma = 0$$

$$\beta a = 0.11$$

$$\beta b = 0.056$$

$$\beta c = 0.093$$

$$S^0 a = 12.1$$

$$S^0 b = 5.5$$

$$S^0 c = 14$$

$$Z^0 = 0.0000003$$

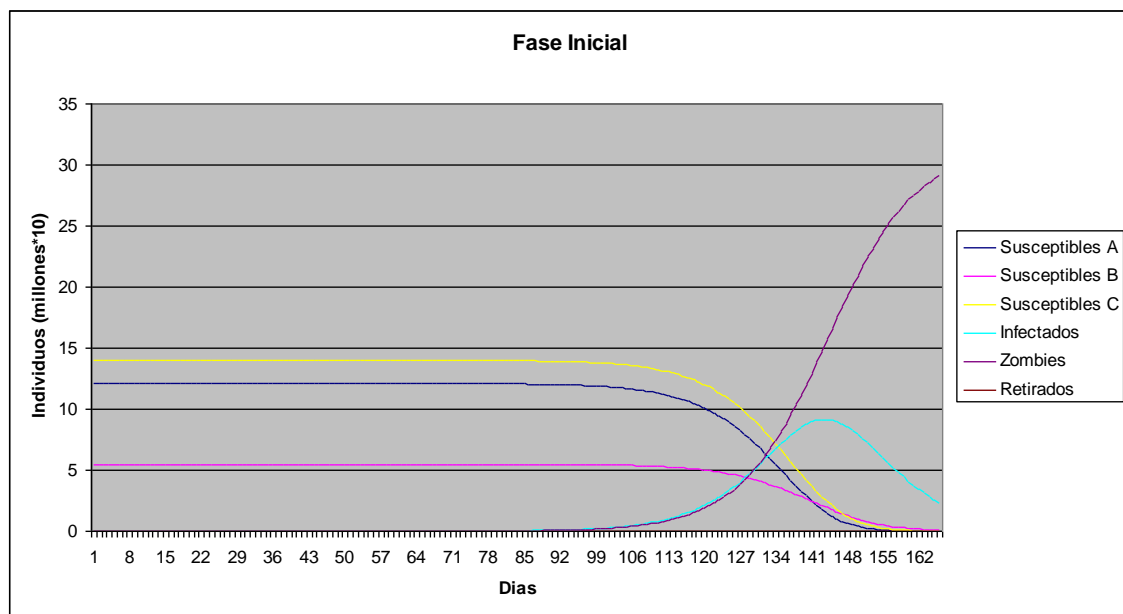
$$I^0 a = 0.0000001$$

$$I^0 b = 0.0000001$$

$$I^0 c = 0.0000001$$

$$\rho = 1$$

$$\alpha = a = 0$$



**Figura 4.11** Gráfico Fase Inicial mejorada en Estados Unidos. Fuente: Propia.

En el gráfico podemos observar que a partir del día 170 prácticamente no quedan susceptibles, en base a los datos podemos afirmar que en el día 180 prácticamente solo quedan Susceptibles de clase B, los de clase A y C a pesar de ser mayoritarios son “derrotados” muy rápidamente y casi inexistentes. También vemos que aproximadamente en el día 155 el número de Zombis es mayor al número de Susceptibles de clase A y B, y el día 149 ya es superior al grupo B.

### • Fase de Histeria

Iniciamos la fase de Histeria el mismo día que la iniciamos en España, el día 167.

$$\Sigma = 0$$

$$\delta_I = 0.014$$

$$\beta b = 0.0012$$

$$S^0 = 4.55$$

$$Z^0_z = 13$$

$$Z^0_k = 4$$

$$I^0 = 4$$

$$\rho = 1$$

$$\alpha_z = 0.008$$

$$\alpha_k = 0.0016$$

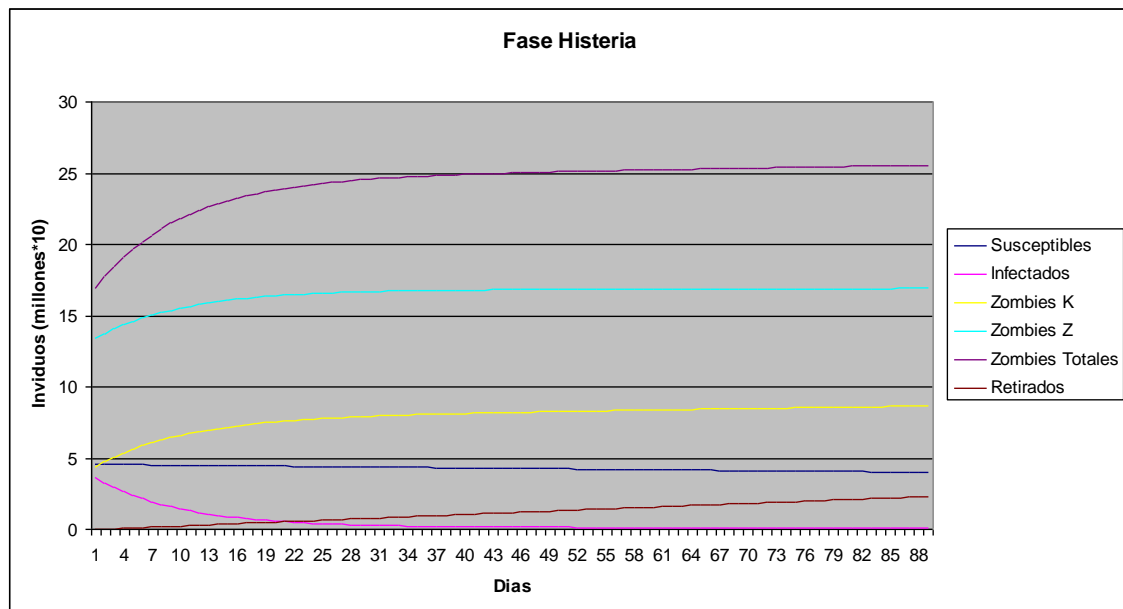


Figura 4.12 Gráfico Fase Histeria mejorada en Estados Unidos. Fuente: Propia.

Vemos que la curva inicial de crecimiento del grupo de los Zombies antes de la fase de convivencia de Zombies y Susceptibles es bastante creciente hasta el día 37, a partir de ese día se estabiliza, aunque sigue en crecimiento ya que este ejemplo la cantidad de Zombies es muy elevada. También podemos observar como los Zombies de clase Z crecen más deprisa que los de clase K, dado que tienen mejor movilidad.

### • Fase de Contra ataque

$$\Sigma = 0$$

$$\beta = 0$$

$$\delta_I = 0$$

$$\rho = 1$$

Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa  
Edson Flores Rosales

$$\alpha = 0.95$$

$$S^0_c = 0.3$$

$$Z^0 = 26$$

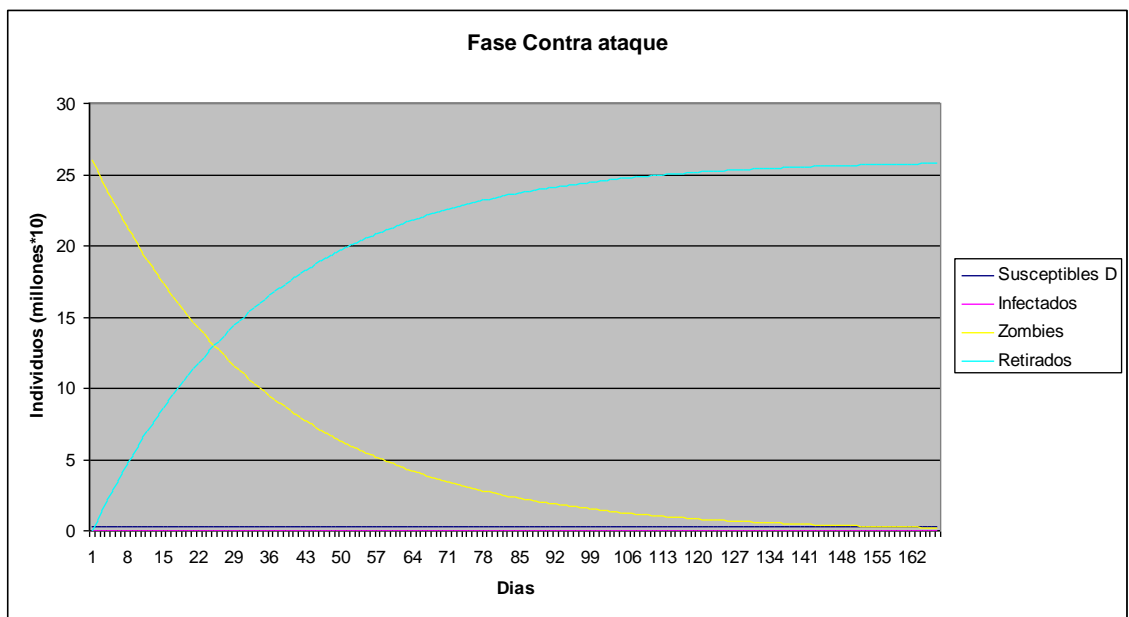


Figura 4.13 Gráfico Fase Contra Ataque mejorada Estados Unidos. Fuente: Propia.

Vemos que en Estados Unidos con su potencia militar tardaría unos 160 días en exterminar casi por completos a los Zombis.

Otra Fase de contra ataque:

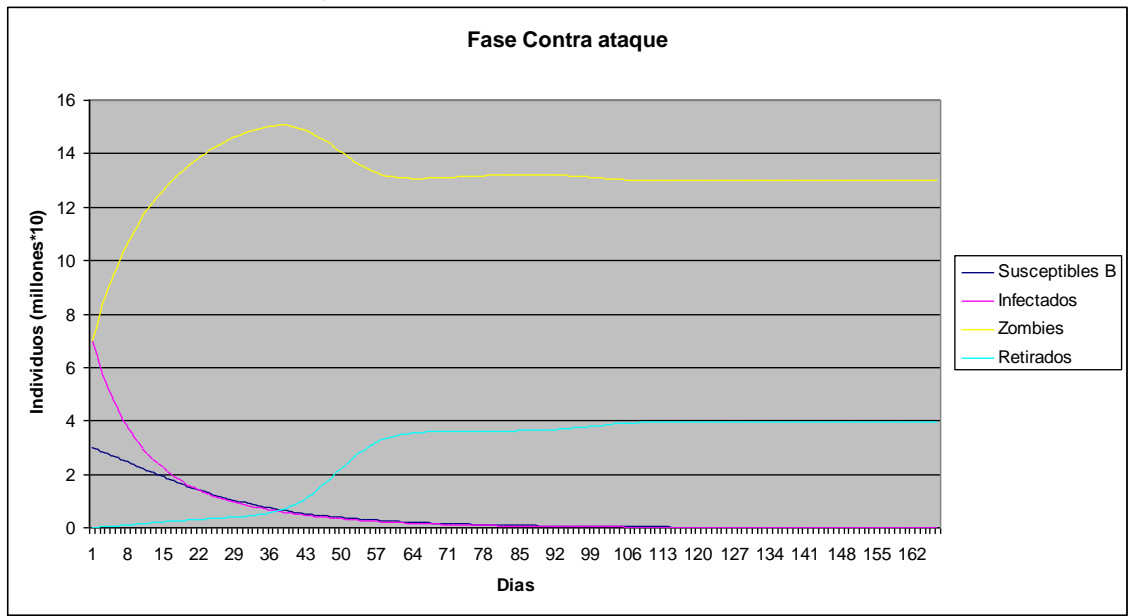


Figura 4.14 Gráfico Fase Contra Ataque, iniciado más pronto en Estados Unidos. Fuente: Propia.

Vemos que igual que en el estado español iniciando en este punto la guerra contra los Zombis, sería demasiado tarde, como hemos visto anteriormente en esta guerra solo saldrían victoriosos los Susceptibles cuando el número de Zombis es muy bajo, al inicio de la fase inicial.

### 4.2.3.3 APLICACIÓN DE LA MEJORA EN LA POBLACIÓN DE ISLANDIA

Ahora analizaremos un país con poco poder militar, como es Islandia. Islandia cuenta a fecha de diciembre de 2017 con 348.580 habitantes [19].

Con una estructura por edad:

0-14 años: 20,4%  
15-24 años: 13,5%  
25-54 años: 39,88%  
55-64 años: 11,81%  
65 años y más: 14,42%

Por lo que aproximando, podríamos considerar, por grupos de edad:

Grupo de edad	Población
De 0 a 14 años y mayores de 60 años.	$20,4\%+14,42+6,5\%=41,32\%$ 144.033 habitantes
De 15 a 29 años	$13,5\%+5,5\%=19\%$ 66.230 habitantes
De 30 a 59 años	39,6% 138.037 habitantes

**Tabla 4.13** Tabla grupos Edad en Islandia. Fuente: [19].

Ciñéndonos a nuestro análisis podemos afirmar que si ocurriera una epidemia Zombi en USA, tomando como ejemplo un número inicial de 10 Zombis, habrían 348.570 Susceptibles, donde podemos extrapolar:

- Aproximadamente 144.0333 Susceptibles tendrán muy pocas o casi nulas capacidades de “vencer” a un Zombi, los llamaremos susceptibles clase A
- Aproximadamente 66.230 Susceptibles tendrán una capacidad muy alta de “vencer” a un Zombi, los llamaremos susceptibles clase B
- Aproximadamente 138.037 Susceptibles tendrán una capacidad media de “vencer” a un Zombi, los llamaremos susceptibles clase C

Hilando más fino, el censo oficial sobre personas con discapacidad en Islandia el año 2012 estima que hay unos 34.857 de discapacitados, aproximadamente el 10% de la población [20].

Consideraremos este grupo de personas con una capacidad nula de supervivencia ante un encuentro con un Zombi, dado que no hay datos exactos de los grupos de edad de las personas discapacitadas, tomaremos un valor similar a los países occidentales ya citados anteriormente, por lo que, entre la edad de 15 y 59 años, un 50% aprox. lo que podemos restar de clase B y C los discapacitados y los sumaremos a la clase A.

Grupo de edad	Población
De 0 a 14 años y mayores de 60 años.	161.461 habitantes
De 15 a 29 años	57.516 habitantes
De 30 a 59 años	129.323 habitantes

**Tabla 4.14.** Tabla grupos de Edad teniendo en cuenta discapacitados en Islandia.  
Fuente: Propia.

Ahora deberíamos analizar la fuerza militar de Islandia, pese a no tener ejército como tal, tiene cuerpos de seguridad, pero supondremos que el número de agentes de 0. Pese a no ser real, puede llegar a ser realidad, ya que es uno de los países más seguros del mundo (el tercero en concreto) y no es debido a la fuerza policial, no portan armas, si no a su estructura social y cultura.

Por lo que la tabla de Susceptibles quedaría de la siguiente manera:

Clase Susceptible	Población	Probabilidad de victoria
A	161.461 habitantes	Muy Baja
B	57.516 habitantes	Media
C	129.323 habitantes	Baja

**Tabla 4.15** Tabla grupos de Susceptibles en Islandia. Fuente: Propia.

De esta manera ya podemos distinguir dentro del grupo de Susceptibles, otros subgrupos, que nos ayudara a analizar mejor el entorno si se diera una epidemia Zombi en España

Ahora bien, en cuanto al grupo de Zombis también podemos hacer subdivisiones como hicimos ya anteriormente:

Clase Zombi	Probabilidad de Victoria	Falta Extremidades
Z	Alta	No
K	Baja	Si

**Tabla 4.16** Tabla grupos de Zombis en Islandia. Fuente: Propia.

En cuanto al grupo de Retirados no existe ninguna consideración relevante para poder hacer algún tipo de análisis.

Estos subgrupos nos servirán para analizar mejor la evolución del contagio por las diferentes etapas que explica el autor, ya que entrarán en juego de distinta forma:

#### • Fase Inicial

$$\Sigma = 0$$

$$\beta_a = 0.11$$

$$\beta_b = 0.056$$

$$\beta_c = 0.093$$

$$S^0_a = 16,1$$

$$S^0_b = 5,7$$

## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa

### Edson Flores Rosales

$$S^0_c = 12,9$$

$$Z^0 = 0.0003$$

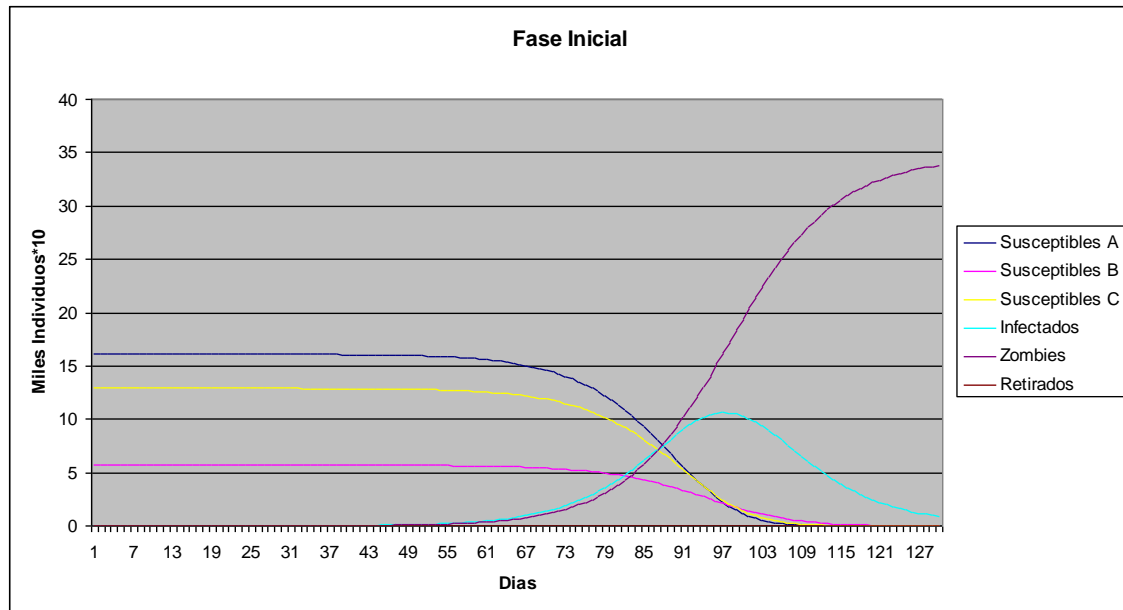
$$I^0_a = 0.0001$$

$$I^0_b = 0.0001$$

$$I^0_c = 0.0001$$

$$\rho = 1$$

$$\alpha = a = 0$$



**Figura 4.15** Grafico Fase Inicial mejorada en Islandia. Fuente: Propia.

Al día 134 prácticamente solo quedarían Susceptibles de clase B y el día 154 se habrían casi extinguido por completo los Susceptibles.

#### • Fase de Histeria

La fase de Histeria, al contrario de Estados Unidos y España donde habíamos elegido el día 167, que es el día cuando solo quedan Susceptibles de clase B en el caso de España, aquí ese día llega antes, el día 134. Por lo que para iniciar esta fase elegiremos el día 134.

$$\Sigma = 0$$

$$\delta_l = 0.014$$

$$\beta b = 0.0012$$

$$S^0_b = 0.0067$$

$$Z^0_z = 20.1$$

$$Z^0_k = 9.7$$

$$I^0_a = 0.26$$

$$I^0_b = 0,23$$

$$I^0_c = 0.25$$

$$\rho = 1$$

$$\alpha z = 0.0016$$

$$\alpha k = 0.0008$$



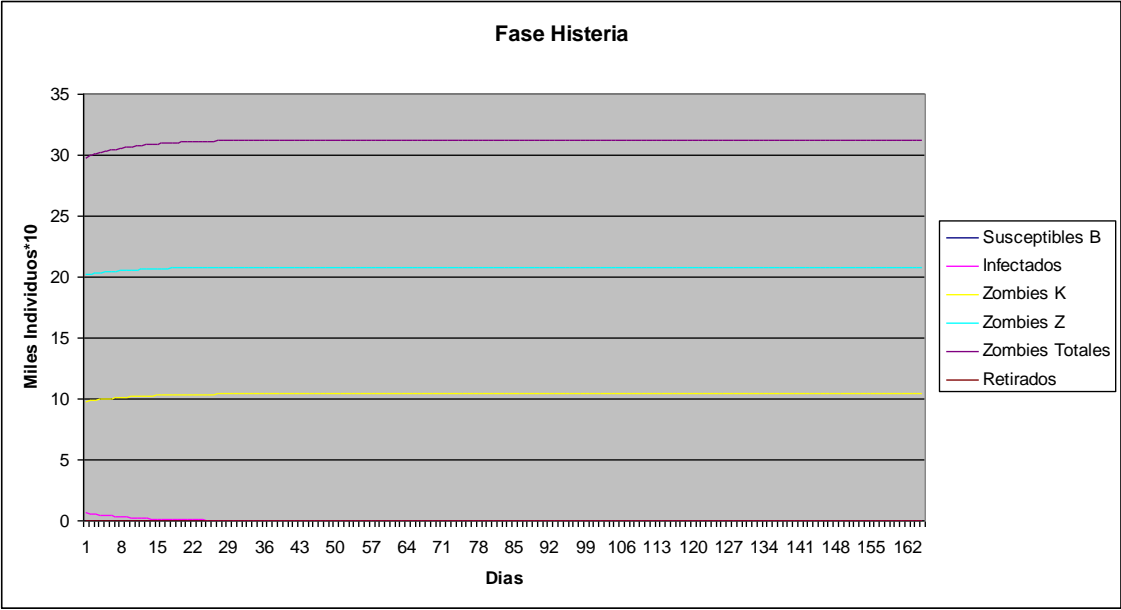
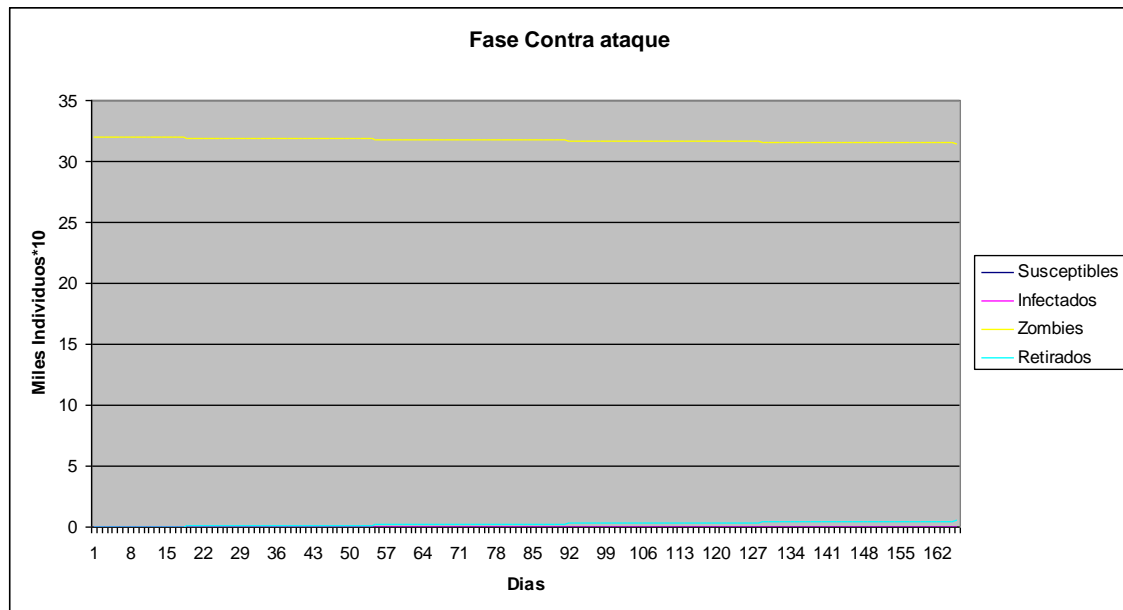


Figura 4.16 Gráfico Fase Histeria Mejorada en Islandia. Fuente: Propia.

Vemos que la curva inicial de crecimiento del grupo de los Zombis antes de la fase de convivencia de Zombis y Susceptibles es bastante creciente hasta el 7, a partir de ese día se estabiliza.

• Fase de Contra ataque

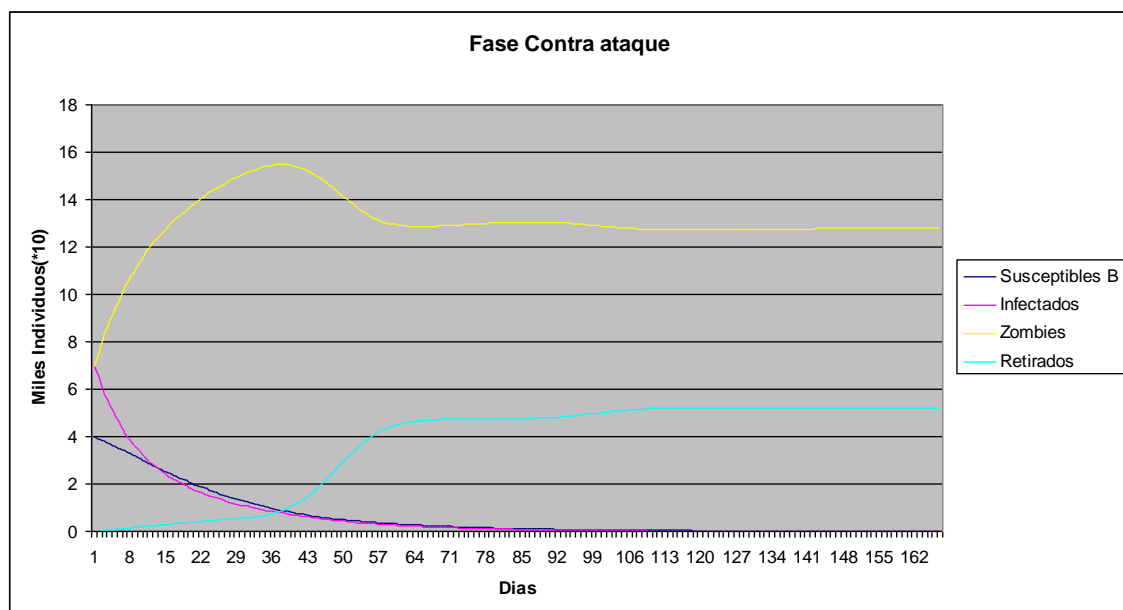
$$\begin{aligned}\Sigma &= 0 \\ \beta &= 0 \\ \delta_I &= 0 \\ \rho &= 1 \\ \alpha &= 0.006 \\ S^0_c &= 0.001 \\ Z^0 &= 26\end{aligned}$$



**Figura 4.17** Fase de Contra Ataque mejorada en Islandia. Fuente: Propia.

En este grafico veríamos que sin un grupo armado la salvación dependería del grupo B de susceptibles en la fase de Histeria, lo cual llevaría mucho tiempo y recursos.

Otra fase de contrataque:



**Figura 4.18** Fase de Contra Ataque mejorada, iniciada más pronto en Islandia. Fuente: Propia.

Vemos que igual que en el estado español y Estado Unidos iniciando en este punto la guerra contra los Zombis, sería demasiado tarde, como hemos visto anteriormente en esta guerra solo saldrían victoriosos los Susceptibles cuando el número de Zombis es muy bajo, al inicio de la fase inicial.

#### **4.2.3.4 CONCLUSIONES**

Como hemos visto en los distintos países, la edad de un Susceptible que conlleva a una mayor habilidad mental y física para evitar ser contagiado en un ataque Zombi es crucial para su supervivencia. Los Susceptibles con una edad “óptima” son los que sobrevivirían a una epidemia Zombi y llegados a ese punto serían los encargados de repoblar el país o región infectada.

Un país o región donde se produzca una epidemia Zombi dejará un entorno solo de gente joven, fuerte e inteligente, además de la población preparada a propósito para este tipo de casos, como la policía o militares, en caso de que sobrevivan a una posible epidemia Zombi.

Por lo que vemos que a mayor % de población de Susceptibles de clase B de un país, más tiempo sobrevivirán los Susceptibles al ataque Zombi, de igual manera, un país con mayor poder militar antes podrá acabar con la epidemia Zombi una vez esta se haya expandido.

Como vemos el poder militar de un país también queda determinado por la cantidad de Susceptible, así que a pesar de tener un gran poder militar, también podrán existir una gran cantidad de contagios por lo que de igual manera complicará o alargará el tiempo de exterminio de Zombis.

También podemos darnos cuenta que es muy importante que los Susceptibles sin la necesidad de militares empiecen a defenderse lo antes posible, ya que una guerra tardía también condenaría a la población humana. Con la posibilidad de que al final no quede población civil y solo militar.

## 5. SISTEMAS COMPLEJOS

Los sistemas complejos han sido usados por físicos, biólogos, economistas y expertos de distintas ramas de la ciencia, donde consideran que algo complejo no es necesariamente complicado.

Los sistemas complejos tienen un comportamiento que a menudo no es intuitivo, las matemáticas, la ciencia y conceptos de ingeniería no son capaces abarcar suficientes datos para la modelización de este tipo de sistemas y así afrontar con resultados satisfactorios su predicción.

No existe un acuerdo por la comunidad científica de la definición de los sistemas complejos, aunque pueden darte una definición con características reconocidas por la comunidad. Estas ideas o características se pueden encontrar en el trabajo de Brodu [21].

Un sistema complejo está compuesto de diferentes partes que guardan algún tipo de relación entre ellas (por norma general ese número de partes suele ser elevado), la interacción entre estas partes crean nueva información no visible para el observador. De estas interacciones además de nueva información también surgen nuevas propiedades entre estas partes que no pueden explicarse si se dieran de forma aislada. Para comprender el funcionamiento de este sistema no basta con conocer el comportamiento de cada parte de forma aislada, ya que existen variables que no se pueden observar a simple vista cuyo desconocimiento no permiten el análisis con precisión del sistema, a la vez que hace más complicado la predicción. Podemos decir que un sistema complejo nos ofrecerá más información de la que cada parte aislada puede darnos.

El conocimiento de cada una de las partes de un sistema complejos no nos asegura conocer su funcionamiento, también es necesario conocer cómo se relacionan cada una de las partes que forma este sistema (Jacobson & Wilensky, 2006 [22]).

En este capítulo comparamos las epidemias reales tratamos de comparar las epidemias reales con una posible epidemia Zombi, por lo que los sistemas biológicos o sistemas formados por entidades vivas (individuos), son sistemas complejos que nos resultaran útiles, por la complejidad que cada individuo tiene, como por las posibles relaciones (Susceptible-Infectado) que se pueden establecer entre ellos, así como las posibles relaciones que estos individuos pueden desarrollar, compitan entre ellos, mueran y por tanto como se modifica como resultado de sus interacciones, acciones, etc.

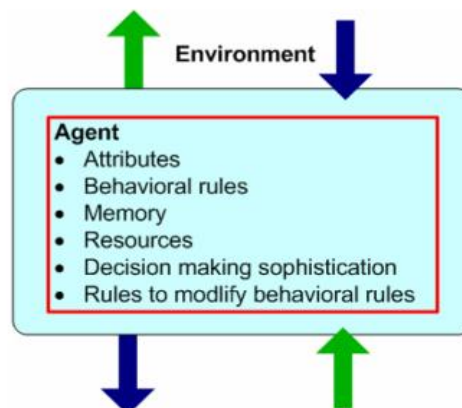


Figura 5.1 Efecto sobre un Agente del exterior. Fuente: [21].

## 5.1 METODOLOGIAS DE MODELIZACIÓN

La finalidad de un modelo es analizar y predecir fenómenos, estos modelos suelen ser una representación conceptual. De forma general se comprende que un modelo permite determinar a partir de una configuración inicial. Todo este apartado del trabajo hace referencia a [23].

Considerando esta definición, podemos afirmar que un modelo no es real, es una representación idealizada del mundo real, sobre todo en el tema general de este trabajo, que se intenta verificar como sería una epidemia zombi con los modelos actuales basados en la ficción.

De forma que los modelos de sistemas complejos nos pueden resultar de mucha ayuda, ya que el pensamiento humano (a veces limitado), por nuestro intelecto no es capaz de procesar todas las posibilidades de un argumento sofisticado de manera equilibrada y simultánea.

Así pues, la modelización científico o matemática se presenta bajo distintas formas como:

- Las teorías matemáticas (basadas en sistemas de axiomas y demostraciones, etc.)
- Los modelos numéricos (basados en ecuaciones lineales, como las ecuaciones antes vistas en este trabajo, o no lineales, ecuaciones diferenciales, etc.)
- Los modelos computacionales (basados en sistemas de agentes, y sus interacciones, sistemas de partículas, etc.)

Las diferentes metodologías de modelización también pueden clasificarse teniendo en cuenta otros criterios o según su forma de diseño, según:

- Si el paso del tiempo se tiene en consideración, si se tiene en cuenta la evolución temporal o se considera solo un momento del tiempo y no se considera el tiempo como una variable, si no se considera el tiempo tenemos modelos estáticos, mientras lo opuesto a esto serían los modelos dinámicos ya que en estos son analizadas las evoluciones temporales.
- La información de entrada, como modelos heurísticos, basados en explicaciones sobre las causas, y modelos empíricos que utilizan observaciones directas.
- El tipo de representación, como los modelos cualitativos, estos en general predicen si el estado del sistema seguirá una dirección o alguna de sus magnitudes variará reproduciendo algún tipo de comportamiento. Por otro lado, los modelos cuantitativos, suelen incluir formulas y/o algoritmos matemáticos que relacionan los valores numéricos con magnitudes comparables a las del sistema real.
- La presencia o no del factor aleatorio, en los modelos deterministas se conoce de forma exacta el resultado ya que este factor es ausente, y la evolución está determinada por el estado inicial (datos usados para simular el modelo son fijos), y modelos probabilísticos si no se conoce con precisión el resultado ya que la aleatoriedad si se encuentra presente como factor, e interviene el azar en la evolución, por lo que en las respuestas existe incertidumbre

Según el objetivo de los modelos también podemos encontrar:

- Modelos predictivos, si pretenden informar del comportamiento de sus parámetros o

variables en un futuro.

- Modelos evaluativos, si pretenden las diferentes alternativas y así poder comprar los resultados de ellas.
- Modelos de optimización, si tratan de identificar un óptimo (máximo o mínimo) del problema, es decir, el mejor de las alternativas posibles.
- Modelos explicativos, si intentan comprobar cómo se conectan las distintas variables para buscar explicación del fenómeno que estudian y así poder demostrar alguna hipótesis.

Cualquier modelo que haya sido desarrollado y verificado puede proporcionar una idea de cómo el sistema estudiado se comporta.

## 6. MODELOS BASADOS EN AGENTES VIVOS

Los modelos basados en agentes, también conocidos de sus siglas en ingles ABMs (Agent-Based Models), son modelos computacionales que tratan con sistemas complejos. Estos modelos simulan las acciones e interacciones entre los elementos autónomos (agentes) dentro de un medio o entorno, esto permite observar que efectos se producen en el conjunto del sistema como consecuencia de la interacción de estos elementos. Todo este apartado del trabajo hace referencia a [24].

Podemos afirmar que estos modelos controlar operaciones simultáneas de múltiples entidades, para poder recrear y predecir acciones e interacciones entre los individuos dentro de un medio cambiante en el que estos evolucionan y desarrollan al largo del tiempo (modelos dinámicos). Por norma general estos modelos tienen en cuenta el factor azar como elemento relevante (modelos probabilísticos). Frecuentemente son considerados modelos cualitativos, pero depende de la parametrización y calibración llevada en la simulación, ya que estos también pueden determinan que sean modelos numéricos. También intentan entender de qué forma y como los fenómenos observados ocurren (modelos heurísticos). Con el avance de esta metodología se están desarrollando modelos con capacidad predictiva (modelos predictivos), aunque en la actualidad para generalizar son esencialmente modelos explicativos.

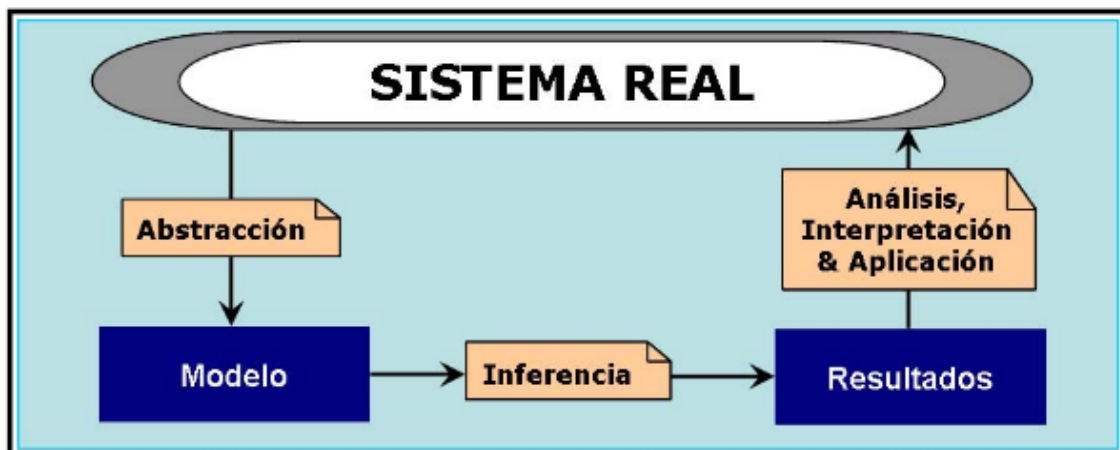
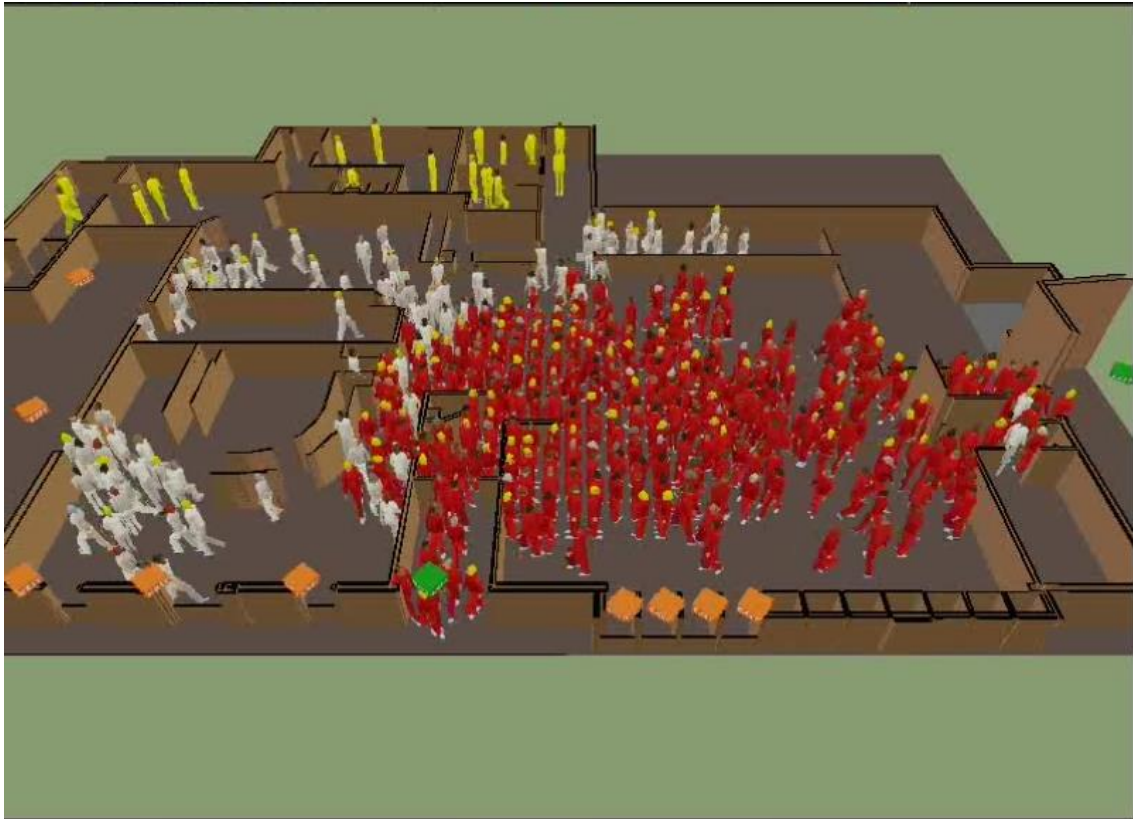


Figura 6.1 Esquema de un sistema Real, basado en agentes vivos. Fuente:[24].

El concepto del ABM es diseñar un modelo de agente y uno de entorno o medio ambiente, implementarlos en un código computacional, y usando recursos de la máquina (más potente que el intelecto humano) simule diversos agentes e interacciones entre ellos en el entorno que comparten estos. El comportamiento del sistema es el resultado del conjunto de los agentes evolucionando en el entorno “creado” por la máquina.



**Figura 6.2** Ejemplo de simulación con Agentes Vivos en un Sistema Real. Fuente: [24].

Esta manera de visualizar el sistema a estudiar contrasta con los modelos “clásicos” que se basan en funciones continuas y derivables en ecuaciones diferenciales, como ya hemos visto en los capítulos anteriores. El espacio es un aspecto importante, ya que según el modelo escogido influirá y tendrá efectos trascendentales para la dinámica que muestre el sistema.

No existen soluciones generalizadas o teóricas para los modelos computacionales que se basan en la simulación, ya que estos buscan obtener soluciones particulares para el problema que se estudia, intentan explicar de qué forma los fenómenos que se estudian ocurren. Para problemas simples, es posible dar una solución generalizada, ya que permite el uso de métodos analíticos basados en una teoría previa, pero si es complejo la simulación solo nos pueden dar una idea, orientarnos hacia una resolución posible.

La simulación nos permite la experimentación controlada y generar experimentos virtuales que muestren el problema, con sus variables y datos, que estamos estudiando. Estos modelos computacionales tienen algunas desventajas como el tiempo necesario para su desarrollo e implementación y también la necesidad de tener en cuenta la cantidad y topología de variables y datos que pueden requerir diseño.

## 6.1 AGENTE INTELIGENTE O VIVO

Los agentes inteligentes, también conocidos como agentes de software, son aplicaciones informáticas que detectan y responden de forma autónoma al entorno en la búsqueda de determinados objetivos diseñados. Estos agentes exhiben cierto nivel de inteligencia. Se pueden usar para ayudar al usuario a realizar tareas repetitivas, como buscar información, programar, etc.

Los agentes inteligentes pueden tener diversas formas, como sofbots, taskbots, etc. No importa que forma o formas tengan, estos agentes pueden mostrar las siguientes características:

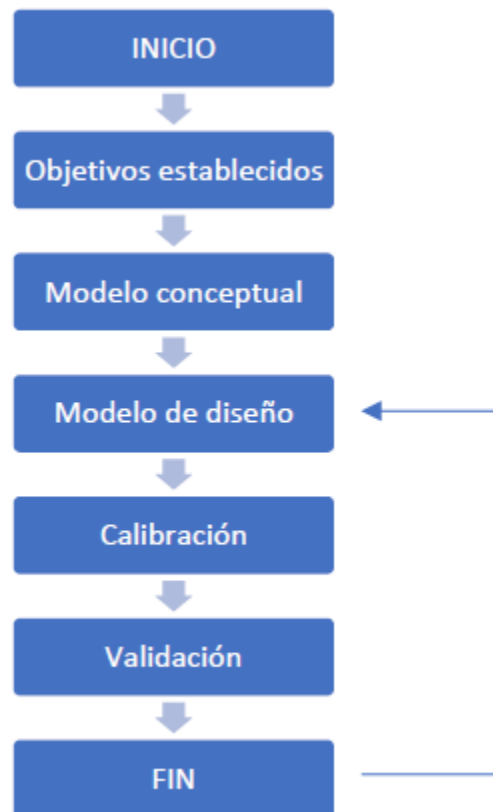
- Autónomo: ser capaces de ejercer control sobre sus propias acciones
- Adaptativo: ser capaces de aprender y adaptar a su entorno.
- Social: se capaces de comunicarse, negociar, colaborar y competir con otros agentes.
- Móvil: poder migrar de una máquina/sistema a otra en una red.
- Orientado a objetivos: ser capaces de actuar de acuerdo con las metas y objetivos con lo que han sido diseñados.
- Comunicativo: ser capaces de comunicarse con otros agentes con protocolos de pensamiento como el lenguaje de comunicación de agentes (ACL).
- Inteligente: ser capaz de exhibir un comportamiento inteligente como el razonamiento, el aprendizaje, el manejo de la incertidumbre, uso de la heurística y el procesamiento del lenguaje natural.

## 6.2 PROCESOS DE MODELADO

El modelado basado en agentes para sistemas inteligentes comienza con un análisis exhaustivo de los sistemas inteligentes. Necesitamos identificar una o algunas características clave para enfocarnos en el sistema. Dado un escenario del sistema inteligente objetivo, primero establecemos un conjunto de objetivos que pretendemos lograr a través de la simulación de la representación basada en agentes del sistema inteligente. En este apartado del trabajo hace referencia a [25].

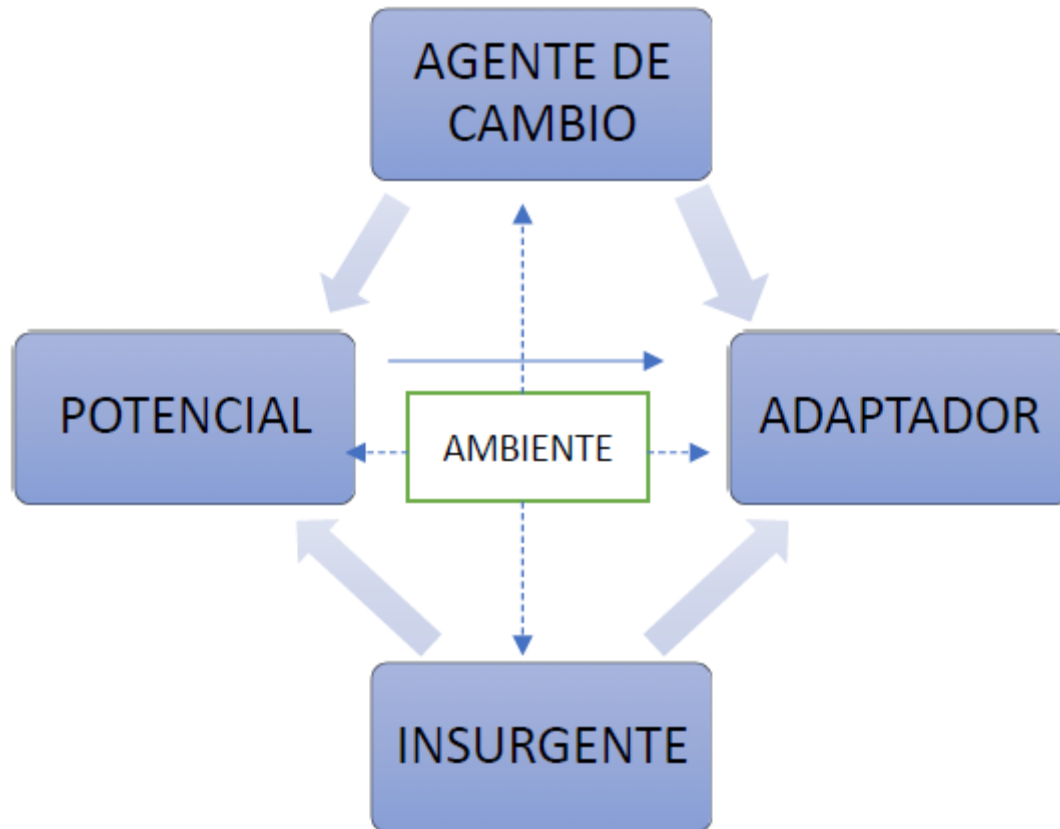
Se crea un modelo conceptual para establecer los requisitos para lograr los objetivos. Esto incluye la definición de las entidades, como agentes, entorno, recursos, procesos y relaciones. La fase de modelado conceptual responde a la pregunta de qué se necesita. El modelo de diseño determina cómo se pueden implementar los requisitos, incluida la definición de las características y los comportamientos relevantes de los agentes.





**Figura 6.3** Esquema de Modelización con Agentes Vivos. Fuente: Propia.

Dependiendo de los objetivos de una investigación en particular, un modelo puede implicar el uso de agentes diseñado. Los agentes diseñados son aquellos dotados de características y comportamientos que representan condiciones para probar hipótesis específicas sobre los sistemas inteligentes. Del mismo modo, el entorno en el que actúan los agentes puede ser diseñado. En la práctica, un estudio puede comenzar como modelos simples, a menudo con agentes y entorno diseñados, para explorar ciertas dinámicas específicas del sistema.



**Figura 6.4** Esquema de influencia de ambiente en un Sistema Real. Fuente: Propia.

**El modelo de diseño se refina a través del proceso de calibración,** en el que los parámetros de diseño se modifican para mejorar las características deseadas del modelo. El último paso en el proceso de modelado es la validación donde verificamos el comportamiento individual del agente, las interacciones y las propiedades emergentes del sistema frente a las características de diseño esperadas. La validación por lo general implica la comparación de los resultados del modelo con resultados comparables en el mundo real.

## 6.2 TRABAJAR MODELOS BASADOS EN AGENTES VIVOS

Los ABMs son modelos computacionales, por lo que deben ser implementados en un código de programación y ejecutados en un entorno informático para obtener resultados de la simulación para posteriormente poder analizarlos. El desarrollo de programas informáticos o códigos de computación propios haciendo uso de lenguajes como FORTRAN, BASIC, JAVA o C++ presentan dificultades para su utilización de ABMs. La utilización de alguna plataforma ya preparada y diseñada expresamente para la implementación y manejo de ABMs facilita enormemente la tarea de programación y ejecución que todo modelo computacional requiere. Existen herramientas de modelización basada en agentes, en las que se pueden implementar los modelos diseñados para los comportamientos de los individuos y que ya disponen de un diseño de espacio estructurado para poder ubicarlo, que son fáciles de comprender, y permiten el desarrollo de diferentes simuladores sin requerir conocimientos avanzados. En el siguiente apartado analizaremos los distintos modelos basados en agentes libres junto con sus implementaciones software.

## 6.3 MODELO BASADO EN AGENTES VIVOS

### 6.3.1 SUGARESCAPE

Sugarscape es un modelo que sigue las reglas presentadas por Joshua M. Epstein y Robert Axtell en su libro *Growing Artificial Societies*.

Los modelos basados en Sugarscape incluyen agentes, entorno y reglas que rigen la interacción de los agentes entre sí y con el entorno.

Consideramos el ecosistema de Sugarscape, como un paradigma dentro de los modelos computacionales basados en agentes, ya que su metodología combina aspectos que provienen de muchos campos de investigación, en *Sugarscape* se combina la dinámica de agentes adaptables con un entorno de simulación basado en autómatas celulares. Este apartado del trabajo hace referencia a [26].

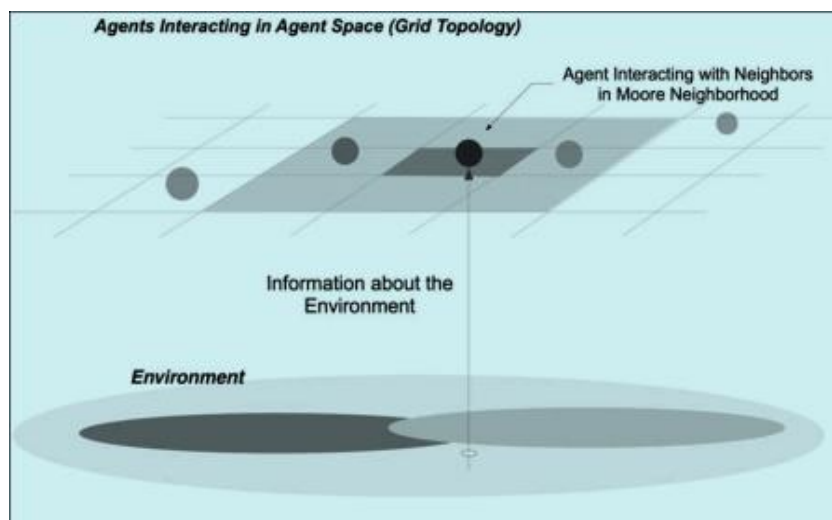
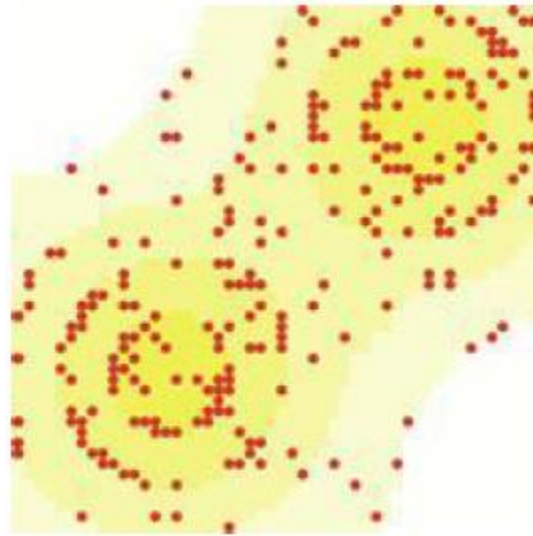


Figura 6.5 Interacción de un Agente Vivo en un Ecosistema. Fuente:[26].

El modelo original presentado por J. Epstein y R. Axtell, es considerado el primer modelo de agente a gran escala, se basa de una cuadrícula de células de 51x51, donde cada celda puede contener diferentes cantidades de azúcar. En cada paso, los agentes miran a su alrededor, buscan y encuentran una celda cercana (las más cercana) llena de

azúcar, se mueven y metabolizan. Pueden dejar la contaminación, morir, reproducirse, heredar fuentes, transferir información, comerciar o tomar prestado azúcar, generar inmunidad o transmitir enfermedades, según el escenario específico y las fuentes definidas en la configuración del modelo.



**Figura 6.6** Simulación con Agentes Vivos usando SugarScape. Fuente:[26].

Los puntos rojos son los agentes y los azúcares están distribuidos en las celdas amarillas.

El azúcar en la simulación podría verse como una metáfora de los recursos artificiales a través del cual el examinador puede estudiar efectos de la dinámica social, como la evolución, el estado civil y la herencia en las poblaciones.

#### **6.3.4 NETLOGO**

NetLogo, diseñado por la Northwestern University-Illinois, se usa para crear modelos basados en agentes, usa el lenguaje Logo, que fue diseñado como Lenguaje de enseñanza primaria para estudiantes.

Los marcos son simples y fáciles de usar, por lo que se recomiendan para usuarios con poca experiencia de programación sin embargo se puede reproducir modelos de investigación realistas.

Inicialmente NetLogo fue lanzado para el ámbito médico, donde se trata el equipo médico como una sola entidad que interactúa con los pacientes. Cada equipo tiene los siguientes atributos clave que pueden ser variados: actitud de asistencia, improvisación y sensaciones hacia los pacientes.

Los resultados de las simulaciones usando NetLogo demuestran que un enfoque de modelado basado en agentes es factible y útil para explorar el impacto del comportamiento del equipo médico en los resultados del paciente.

NetLogo están disponibles para máquinas virtuales basadas en Java, no es de código abierto.

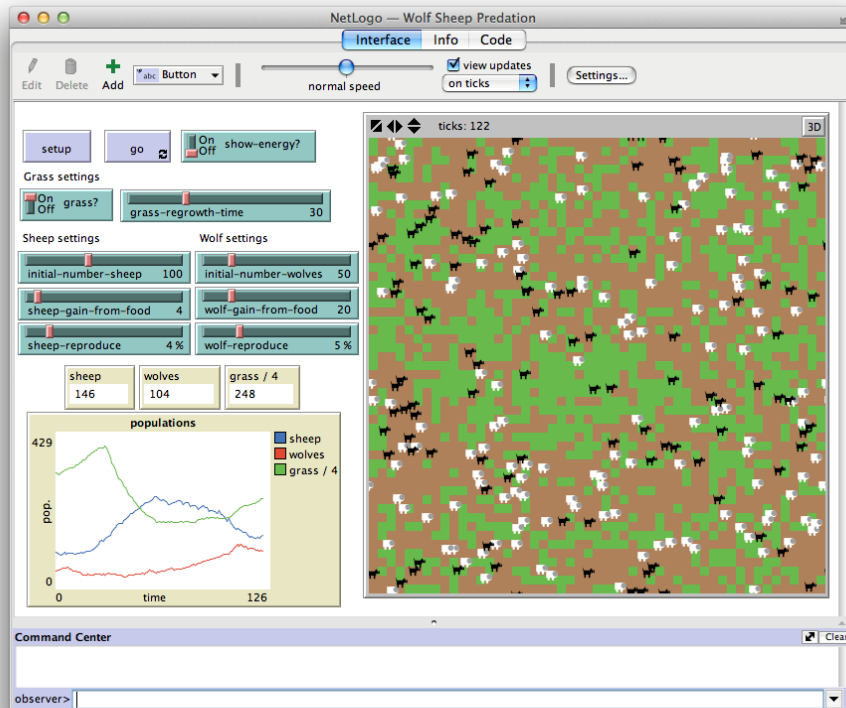


Figura 6.7 Simulación con Agentes Vivos en Netlogo. Fuente:[26].

## 6.4 APLICANDO ABM EN LA “ZOMBIFICACIÓN”

Ahora procederemos a describir como pasar un modelo de ecuaciones, como las que hemos descrito en la primera parte del trabajo donde se intentaba describir cómo se expandiría una epidemia Zombi en mundo real, a un modelo basado en agentes. Simularemos distintas situaciones y sacaremos conclusiones de los resultados, como por ejemplo los beneficios del uso de aplicar “poder de cálculo computacional”.

Las ecuaciones usan un modelo “top-down”, se formula un resumen del sistema, sin especificar detalles.

Cada parte del sistema se refina diseñando con mayor detalle. Cada parte nueva es entonces redefinida, cada vez con mayor detalle, hasta que la especificación completa es lo suficientemente detallada para validar el modelo.

Los ABMs en contraste, su diseño es *bottom-up*, las partes individuales se diseñan con detalle y luego se enlazan para formar componentes más grandes, que a su vez se enlazan hasta que se forma el sistema completo. Las estrategias basadas en el flujo de información “bottom-up” se antojan potencialmente necesarias y suficientes porque se basan en el conocimiento de todas las variables que pueden afectar los elementos del sistema.

Por lo que para poder obtener resultados más realistas el uso de ecuaciones diferenciales enfocado en un modelo de agentes es adecuado, ya que obtendremos muchos beneficios.

### 6.4.1 METODOLOGIA

Usaremos el modelo básico de Munz et al. (2009), y convertiremos sus ecuaciones diferenciales a ABM. Recordemos el sistema de ecuaciones:

$$\frac{dS}{dt} = \Pi - \beta SZ - \delta S$$

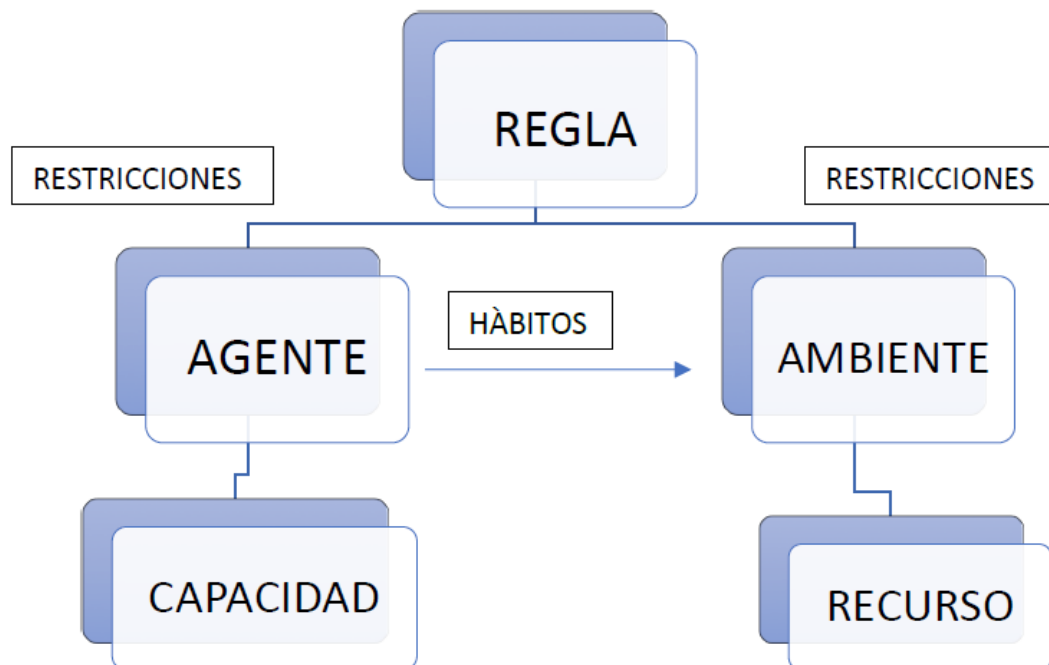
$$\frac{dZ}{dt} = \beta SZ + \vartheta R - \alpha SZ$$

$$\frac{dR}{dt} = \delta S + \alpha SZ - \vartheta R$$

Para ello primero haremos una primera aproximación en el modelo Sugarscape y luego implementaremos el caso en NetLogo.

### 6.4.2 APROXIMACIÓN MODELO SUGARESCAPE

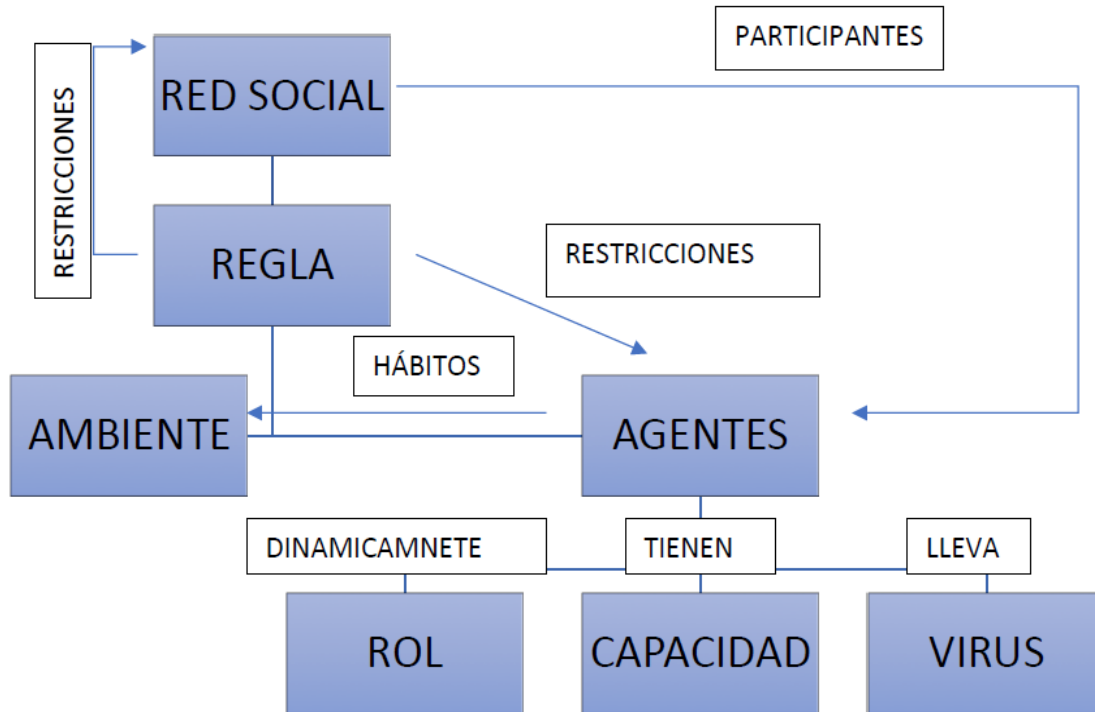
Sugarscape es muy útil para simplificar problemas, su esquema base es el siguiente:



**Figura 6.8** Esquema de aproximación a modelo Sugarscape. Fuente: Propia.

Planteando adecuadamente este esquema podemos usar Sugarscape. Dado que simularemos una epidemia Zombi hay que tener en cuenta que en una sociedad humana, las personas se relacionan entre sí, formando redes (redes sociales).

Debido a que el modelo sugarscape carece de redes sociales, no podríamos describir de forma natural los virus que se extienden a través de las redes sociales en una sociedad artificial. Por lo que propondremos un modelo general de ciudad Zombi para representar la sociedad. Por lo que:



**Figura 6.9** Esquema modelo ciudad Zombi. Fuente: Propia.

- El Agente es proactivo, automático y con entidad propia. Puede interactuar con otros agentes y tiene algunas capacidades tales como la interacción y la percepción de las relaciones sociales con otros agentes.
- Red Social se compone de relaciones sociales entre agentes, que construyen la estructura social. Mientras tanto, debe cumplir con las reglas, como una red sin escala.
- El medio ambiente es el espacio donde habitan los agentes, que se compone de rejillas. El medio ambiente también debe cumplir con las reglas.
- La regla debe ser cumplida por los agentes, las redes sociales y al medio ambiente, no deben actuar en contra de la norma.
- El rol representa a los agentes especiales en algunas situaciones emergentes, por ejemplo, agentes infectado con virus podría ser visto como el papel de zombi. Los agentes podrían jugar dinámicamente papel diferente según diversas situaciones.
- La capacidad es la habilidad de los agentes como el movimiento y la interacción. Los agentes podrían poseer algunas capacidades naturales.
- El Virus es la entidad que no tiene características de comportamiento, y podría transmitirse entre agentes por interacciones u otras formas. Podría ser una propiedad de los agentes para denotar o mostrar agentes ya sea que hayan infectado el virus.

Un modelo que defina una epidemia Zombi podría definirse como una tupla  $M = \langle \text{AGENTE}, \text{MEDIO}, \text{SN}, \text{ROL}, R \rangle$ , dónde:

- AGENTE es el conjunto de todos los agentes de la sociedad, ya que cualquier agente pertenece al grupo AGENTE, el agente es una tupla  $\langle \text{CAP}, \text{VIRUS} \rangle$ , CAP es el conjunto de capacidades que posee el agente, y VIRUS es el conjunto de virus que han infectado a un agente.
- SN es el conjunto de todas las relaciones entre los agentes. Cualquier relación  $r$  pertenece a SN, entonces  $r$  pertenece a  $2^{\text{AGENTE} \times \text{AGENTE}}$ .
- MEDIO es el conjunto de todos los ambientes en la sociedad.
- ROL es el conjunto de todos los roles en la sociedad, y zombi es el rol especial en el conjunto ROLES.
- R es el conjunto de todas las reglas en la sociedad. R restringirá los comportamientos o estructuras de AGENTE, ROL, SN y MEDIO.

### 6.4.3 CIUDAD ZOMBI

La figura presenta una muestra simple de un modelo de ciudad zombi, y hay numerosos agentes que habitan el paisaje (medio). Los agentes amarillos no están infectados por el virus; dos agentes en rojo han sido infectados con el virus. Además, hay algunas relaciones entre estos agentes, y estos las relaciones han constituido la red social de esta sociedad artificial. Podríamos modelar una sociedad artificial bajo el efecto de virus de los siguientes tres aspectos.

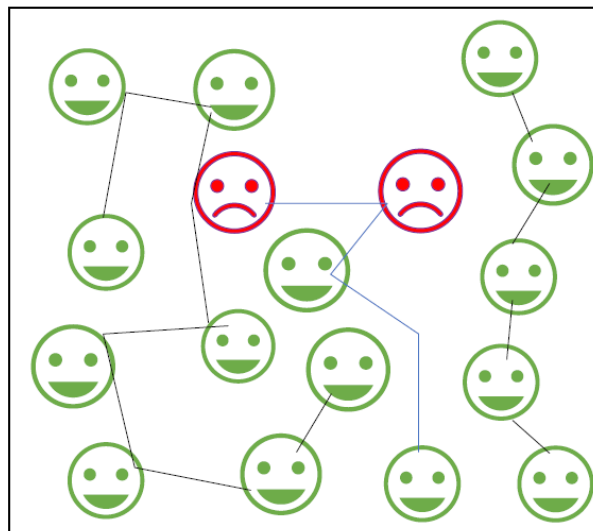


Figura 6.10 Representación sociedad Zombi. Fuente: Propia.

#### • Agente

Los agentes deben cumplir con las reglas. Estas reglas incluyen la restricción de las interacciones entre agentes, reglas de movimientos de agentes y reglas de propagación de virus entre agentes, etc.

Mientras tanto, los agentes tienen algunas capacidades que podrían definirse según las aplicaciones. Estas capacidades también deberían cumplir con las reglas.



#### • Medio ambiente

El medio ambiente es el espacio donde los agentes viven o habitan, que se podría administrar diferentes significados según los requisitos de las aplicaciones. El ambiente también debería cumplir con algunas reglas (por ejemplo, solo hay un agente en una cuadrícula).

#### • Red social

Para las sociedades artificiales con virus o enfermedades infecciosas, las redes sociales son una parte importante y representa las macro relaciones entre los agentes. Por otra parte, la red social tiene su estructura, que define reglas o restricciones para constituir la red social.

### 6.4.3.1 MODELANDO CIUDAD ZOMBI

A continuación, vamos a presentar un ejemplo de modelización con Sugarscape utilizando como idea una posible ciudad zombi.

Podemos suponer 100 personas con relaciones sociales que interactúan entre ellas en una red social. En la inicialización y como inicio de la propagación del virus podemos decir que dos personas han sido infectadas con virus, el virus sigue un modelo de propagación de SZR.

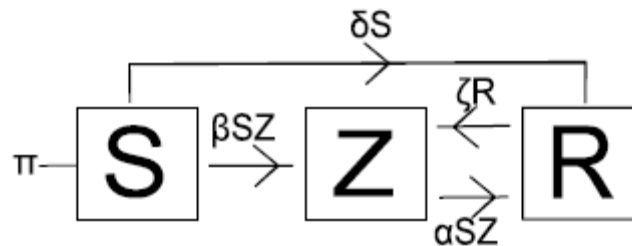


Figura 6.11 Modelo SZR. Fuente: [1].

Basado en el modelo de la ciudad Zombi antes descrito, podríamos modelar este caso desde tres aspectos: agente, red social y el medio ambiente, y las reglas de los tres aspectos se describen de la siguiente manera:

**-Agentes:** Como antes comentamos 100 agentes, y dos de ellos han sido infectados con virus. Los virus interactúan con los agentes y tienen relaciones sociales con ellos. Por otra parte, los virus pueden infectar a los agentes siguiendo el modelo SZR. Basado en este caso, hay tres roles, incluido el Susceptible, persona infectada (Zombi), Retirados. La transición de roles entre los agentes debería seguir Modelo SZR que podría definirse según las aplicaciones. Estas capacidades también deberían cumplir con las reglas.

**-Red social:** un agente se vinculará con otro agente con el grado mínimo y no vinculándose consigo mismo. Esto quiere decir que un virus infecta a un agente no infectado de forma independiente a otro virus.

**-Medio ambiente:** red de  $32 * 32$ , los agentes viven en este medio ambiente. Esto solo es una explicación, ya que el modelo Sugarescape está definido en un ambiente dividido en celdas.

Dado que esto solo sería una aproximación, no simularemos la ciudad Zombi en SugarEscape y pasaremos directamente a modelar con Netlogo esta situación, dado que NetLogo tiene mejores herramientas.

## 6.5 IMPLEMENTACION MODELO AGENTE ZOMBI

A continuación, pasaremos el modelo antes propuesto de ciudad zombi a un modelo de agente para poder implementarlo, quedaría de la siguiente manera:

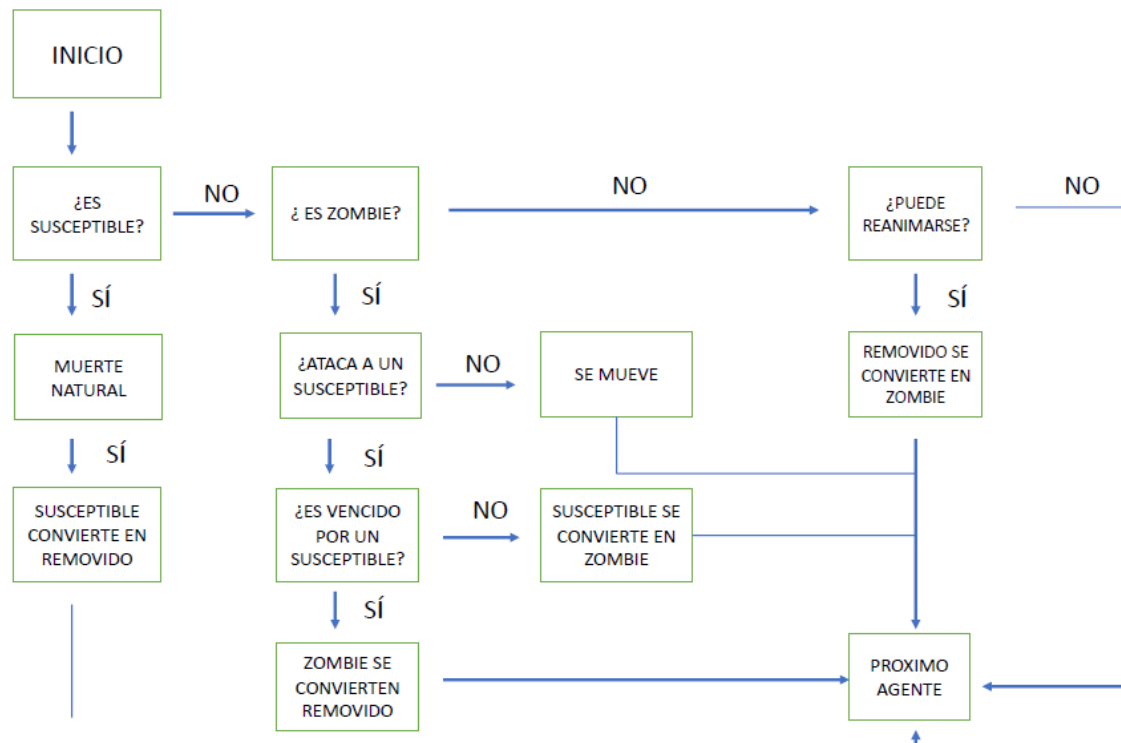


Figura 6.12 Modelo de Agente Zombi. Fuente: Propia.

Ahora se requieren parámetros adicionales por que consideramos el espacio, ya que una infección se propaga por proximidad. Los agentes ahora son capaces de movimiento, entonces ahora debemos considerar su velocidad. Puede ser apropiado, dependiendo del modelo, para asignar diferentes velocidades a las diferentes poblaciones de agentes. En nuestro ejemplo, establecemos una velocidad a la cual los agentes susceptibles se mueven, y una velocidad a la que se mueven los agentes zombis.

Se requieren parámetros adicionales para describir el entorno (dimensiones, estructura interna, etc.).

### 6.5.1 DISEÑO EN NETLOGO

A continuación, haremos pruebas con un modelo de agentes en Netlogo inspirado en los modelos analizados y veremos cómo los diferentes Agentes se comportan a lo largo de la ejecución, para ellos definiremos distintos tipos de agentes de Agentes y parámetros que influirán a estos.

Los agentes implementados son:

**-Zombis:** Persona infectados por el virus Zombi.

**-Humanos:** Personas no infectadas por el virus Zombi, pero que puede ser infectados por un Zombi en caso de ataque.

**-Humanos Armados:** Personas no infectadas por el virus Zombi, pero que en caso de ataque de un Zombi tiene más probabilidades de derrotar a uno.

Los parámetros o características que influirán sobre el comportamiento de estos Agentes son:

**-Puntería:** En el caso de los Humanos o Agentes Armados será una variable que determinará la puntería en el momento de disparar a un Zombi y derrotarlo.

**-Arma Recogida:** Es la cantidad de armas que los humanos tendrán disponible en un determinado momento, una vez recojan esta arma pasarán a ser Humanos-Armados.

**-Velocidad Zombi:** Velocidad de desplazamiento que dispone los Zombi para “cazar” a los humanos.

**-Velocidad Humano:** Velocidad de desplazamiento de disponen los Humanos para escapar de los Zombi, en el caso de los Humanos Armados este parámetro hará que se muevan más deprisa lo que puede hacerles más efectivos a la hora de vencer los Zombis si el parámetro de puntería es alto. Este parámetro también aumenta la posibilidad de que un Humano recoja un arma.

**-Visión Zombi:** Capacidad de un Zombi de detectar un Humano o Humano Armado cerca, a mayor capacidad de visión mayor capacidad de “caza”.

**-Visión Humano:** Capacidad de un Humano de detectar a un Zombi cerca, a mayor capacidad de visión mayor capacidad de escape en el caso de los Humanos, en el caso de los Humanos Armados significara mayor capacidad de derrotar a un Zombi si la puntería es la adecuada.

## 6.5.2 SIMULACIONES NETLOGO

Para realizar estas pruebas podemos usar, como anteriormente en el trabajo se ha hecho, diferentes fases por las que pasaría una epidemia Zombi real y para cada etapa daremos un número de Agentes iniciales con un valor para los diferentes parámetros.

Entorno de pruebas implementado:

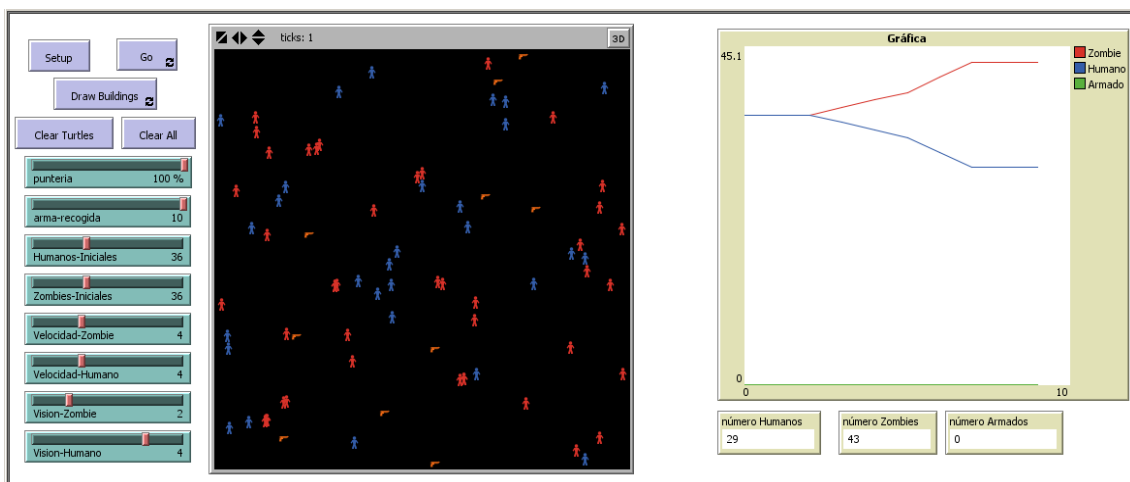


Figura 6.13 Entorno de pruebas NetLogo (simulador). Fuente: Propia.

Como vemos, los parámetros para hacer las diferentes pruebas las puede elegir el

propio usuario, a parte de los parámetros dispone de una serie de botones:

- **SETUP**: Inicia los agentes con los parámetros indicados.
- **GO**: Inicia la simulación.
- **Clear Turtles**: Limpia todos los agentes.
- **Clear All**: Limpia todo, agente y gráficos.
- **Draw Buildings**: Pinta paredes, estas paredes interactúan con los Zombis y humanos.

El medio donde se mueven los humanos (azules), zombis (rojo) y humanos-armados (verde), es el fondo negro, donde allí los humanos pelearan por la supervivencia contra los Zombis, pasaremos a las siguientes pruebas:

#### -Fase inicial:

Humanos: 70

Zombis: 5

Velocidad Zombi: 6

Velocidad Humano: 4

Visión Zombi: 2

Visión Humano: 4

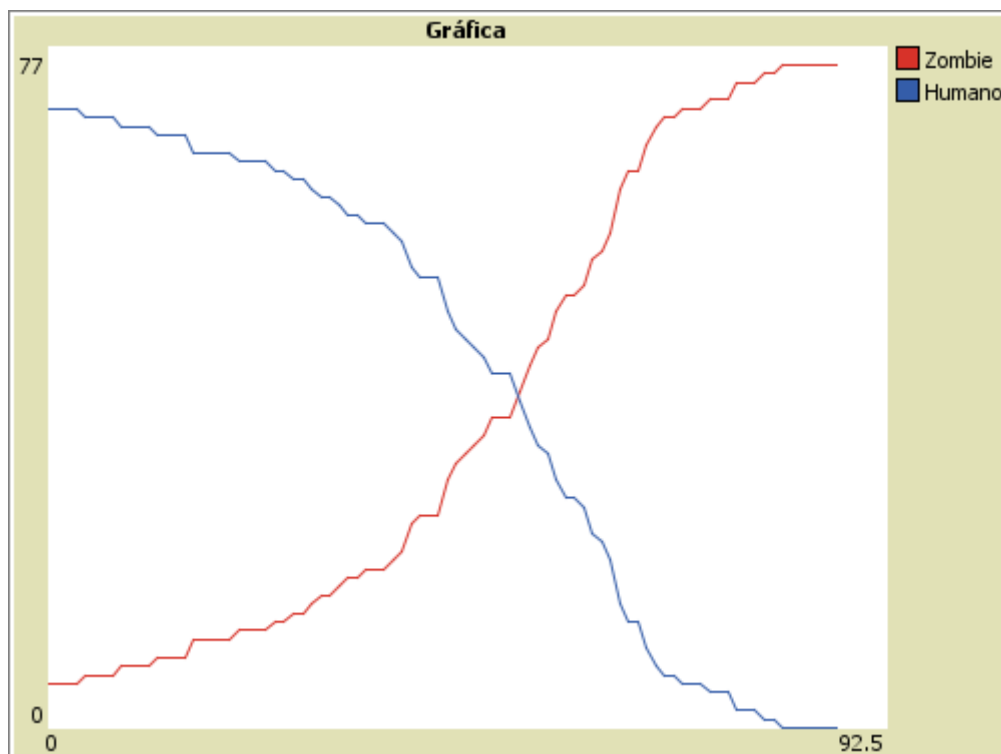


Figura 6.14 Gráfico resultante del simulador en Fase Inicial. Fuente: Propia.

## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa

Edson Flores Rosales

La simulación de una Fase Inicial con los parámetros anteriores nos da como resultado una clara Apocalipsis Zombi donde los humanos quedarían eliminados por completo. El simulador usa como medida de tiempo Ticks, estos ticks podemos considerarlos como días, por lo que en cerca del día 81 los humanos quedarían completamente aniquilados, también podemos analizar que el día 52 el número de Zombis y Humanos se igualan en 37 de cada grupo aproximadamente.

Para esta Fase Inicial también podemos suponer unos Zombis menos inteligentes y más lentos, por lo que las variables cambiarían a:

Humanos: 70

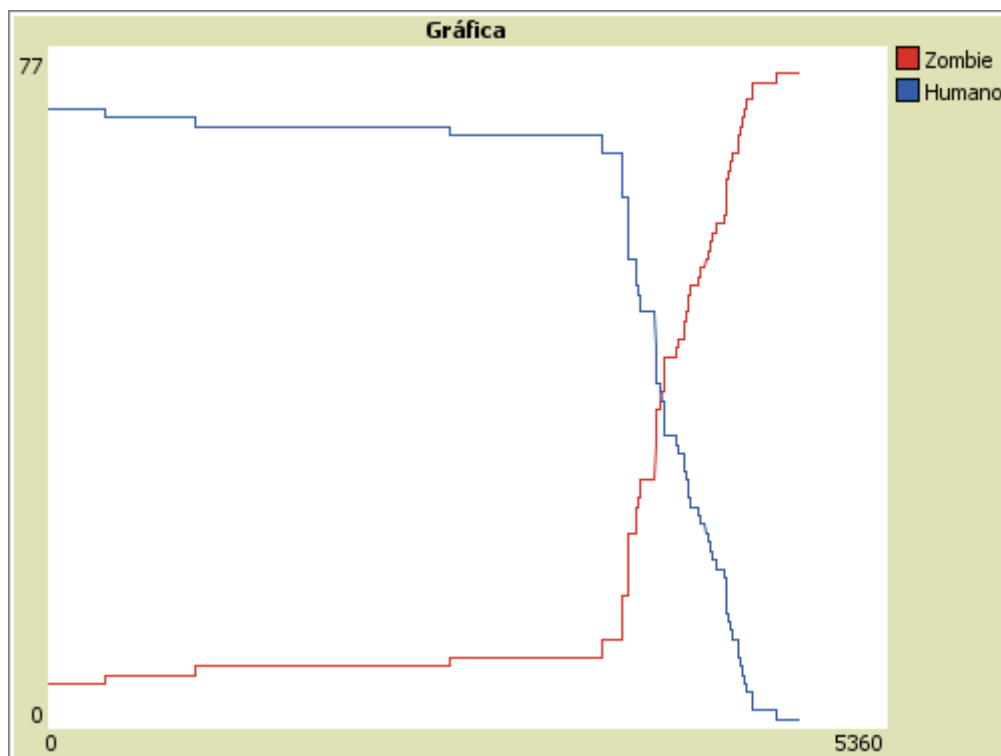
Zombis: 5

Velocidad Zombi: 2

Velocidad Humano: 4

Visión Zombi: 1

Visión Humano: 4



**Figura 6.15** Gráfico resultante del simulador en Fase Inicial, Zombis menos inteligentes. Fuente: Propia.

En la simulación observamos como el avance Zombi es mucho más lento, pese que los humanos igualmente son eliminados estos tardan más tiempo en ser infectados, el número de Humanos llega a 0 el día 4810 y no es hasta el día 3910 que el número de Zombis y Humanos se igualan. También observamos que el número de humanos empieza a decrecer y por lo tanto el de Zombis a crecer de manera más notoria hasta el día 3510, en ese momento hay 10 Zombis porque podemos suponer es una cantidad clave para el avance Zombi.

Para hacer más realista estas simulaciones pasaremos a la fase de contra ataque, donde los humanos dispondrán de armas para defenderse, esta fase tendrá los siguientes parámetros:

**-Fase Contra ataque:**

Humanos: 70

Zombis: 5

Velocidad Zombi: 6

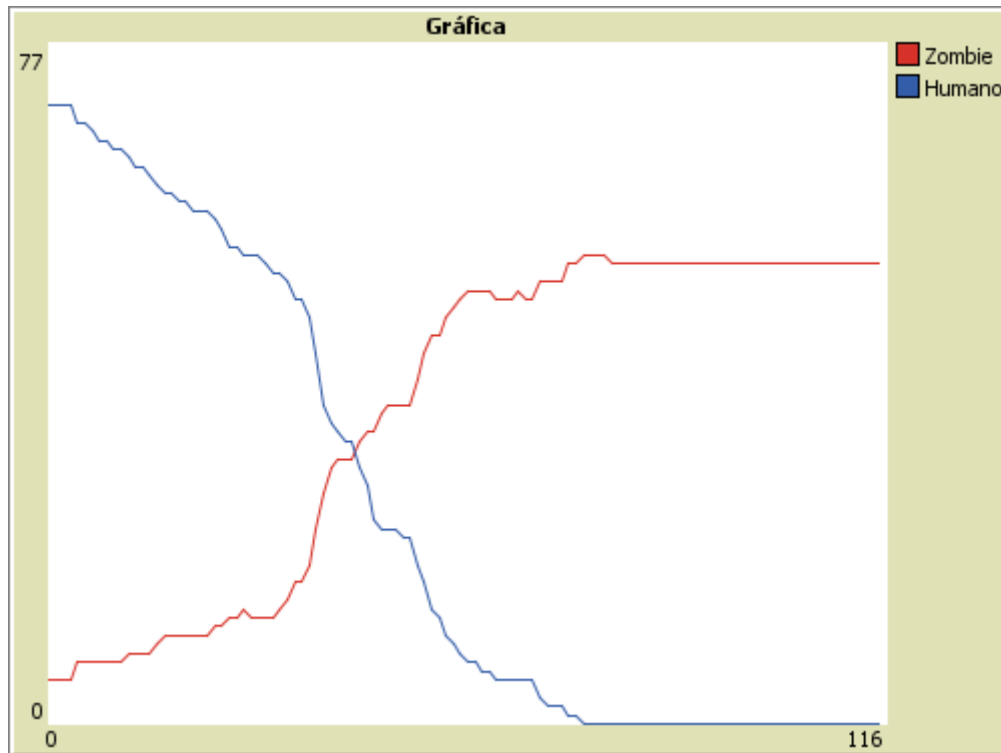
Velocidad Humano: 4

Visión Zombi: 2

Visión Humano: 4

Arma Recogida: 5

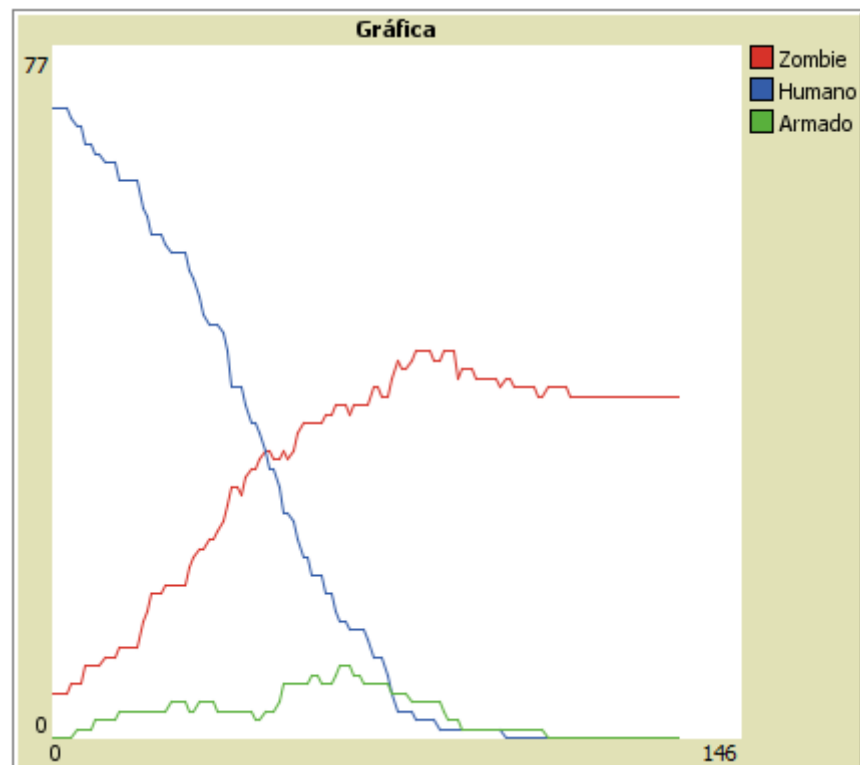
Puntería: 50%



**Figura 6.16** Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque. Fuente: Propia.

Esta simulación hemos tenido en cuenta una fase de contra ataque muy temprano donde el número de Zombis es muy bajo y el de humanos alta, observamos como los Zombis igualmente vuelven a vencer a los humanos, el día 79 son todos eliminados quedan 52 Zombis solo ya que algunos han sido eliminados por Humanos Armados. El día 42 los dos grupos tienen el mismo número de individuos, 31 Zombis y 31 Humanos.

Otra simulación con los mismos valores nos da una gráfica como esta, en la que ya mostramos los humanos armados:



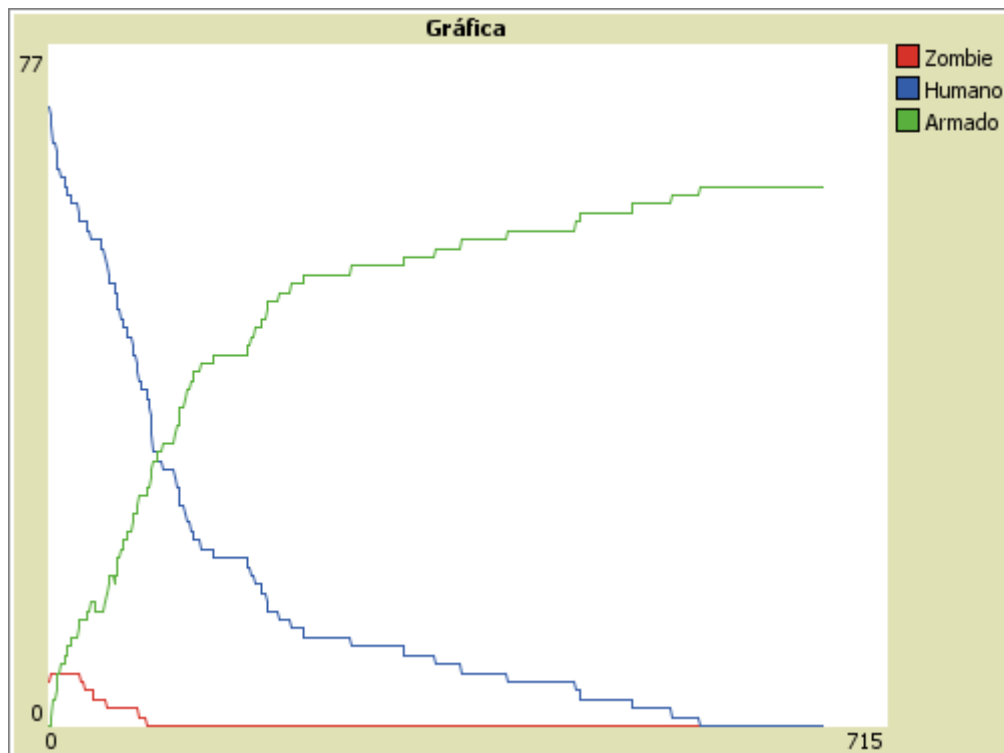
**Figura 6.17** Gráfico alternativo resultante del simulador en Fase Contra Ataque. Fuente: Propia.

Esta vez los humanos sobreviven hasta el día 95 y en concreto los humanos armados hasta el día 106, este día quedarían 38 Zombis.

Para esta Fase de Contra ataque también podemos suponer unos Zombis menos inteligentes y más lentos, además de unos humanos con más posibilidad para armarse y usar mejor las armas, por lo que las variables cambiarían a:

Humanos: 70  
Zombis: 5  
Velocidad Zombi: 2  
Velocidad Humano: 4  
Visión Zombi: 1  
Visión Humano: 4  
Arma Recogida: 10  
Puntería: 80%

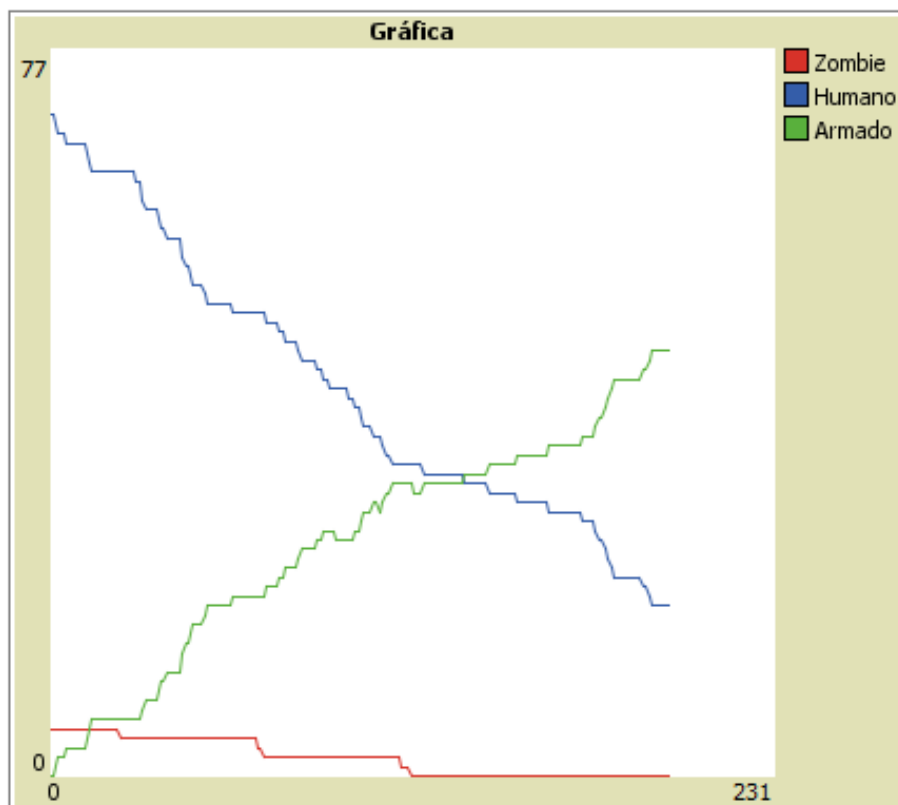




**Figura 6.18** Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque, Zombis menos inteligentes. Fuente: Propia.

Esta simulación observamos que los humanos resultan vencederos, ya que estos se arman y consiguen defenderse, el día 80 ya habrían acabado con todos los Zombis dado que a pesar de ser pocos los primeros días se propagarían hasta que los humanos se armasen. Sobreviven 65 humanos.

En otra simulación con los mismos valores, tenemos este resultado:

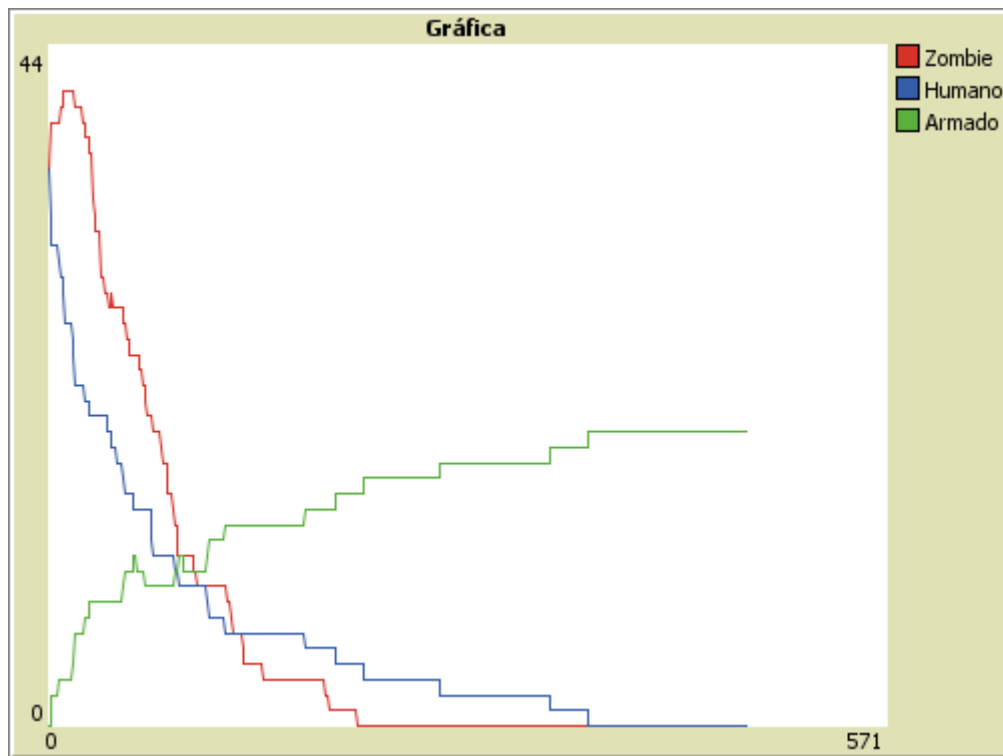


**Figura 6.19** Gráfico alternativo resultante del simulador en Fase Contra Ataque, Zombis menos inteligentes. Fuente: Propia.

En esta ocasión vemos que los Zombis no serían eliminados hasta el día 116, en total en esta simulación sobrevivirían 63 humanos.

En la siguiente simulación tendremos una fase de Contra ataque tardía, cuando los Zombis superan en número a los Humanos, los humanos ya tendría un mejor plan y sus capacidades no serían bajas, además de unos Zombis no muy inteligentes ni rápidos, esta situación queda definida por las siguientes variables.

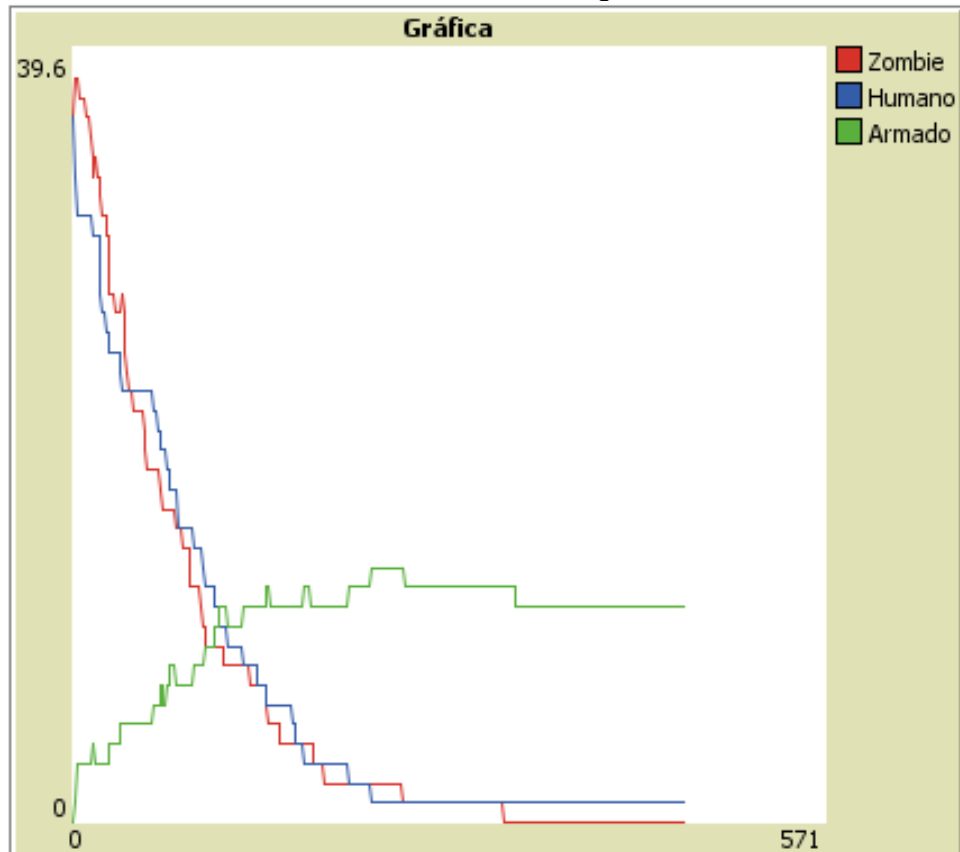
Humanos: 36  
Zombis: 36  
Velocidad Zombi: 2  
Velocidad Humano: 4  
Visión Zombi: 1  
Visión Humano: 4  
Arma Recogida: 10  
Puntería: 80%



**Figura 6.20** Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía. Fuente: Propia.

Esta simulación volvemos a observar cómo los humanos resultan vencedores, el día 210 los Zombis quedan eliminados, ese mismo día quedarían 4 humanos y 15 humanos armados aproximadamente. Como dato curioso podemos observar que el día 89 hay casi la misma cantidad de Zombis, de Humanos y de Humanos armados.

Otra simulación con los mismos valores nos da una gráfica como esta:

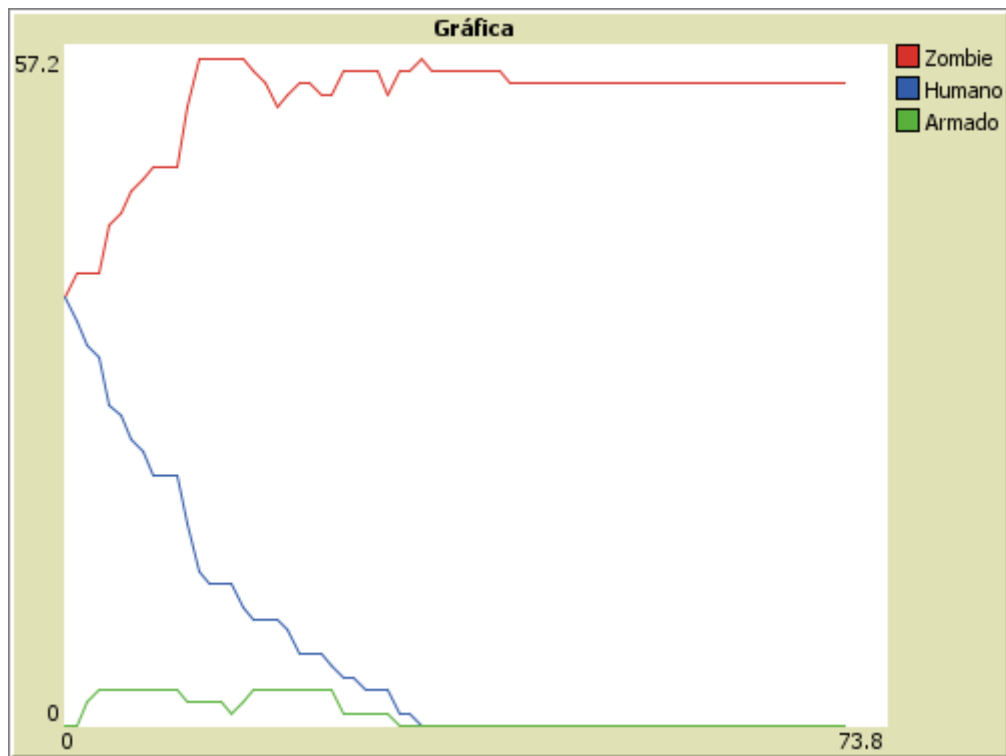


**Figura 6.21** Gráfico alternativo resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía. Fuente: Propia.

En esta ocasión los Zombis serían eliminados por completo el día 329 y sobrevivirían 11 humanos armados y 1 humano.

Ahora simularemos el mismo caso anterior, pero con los Zombis más inteligentes y rápidos, los valores serán los siguientes:

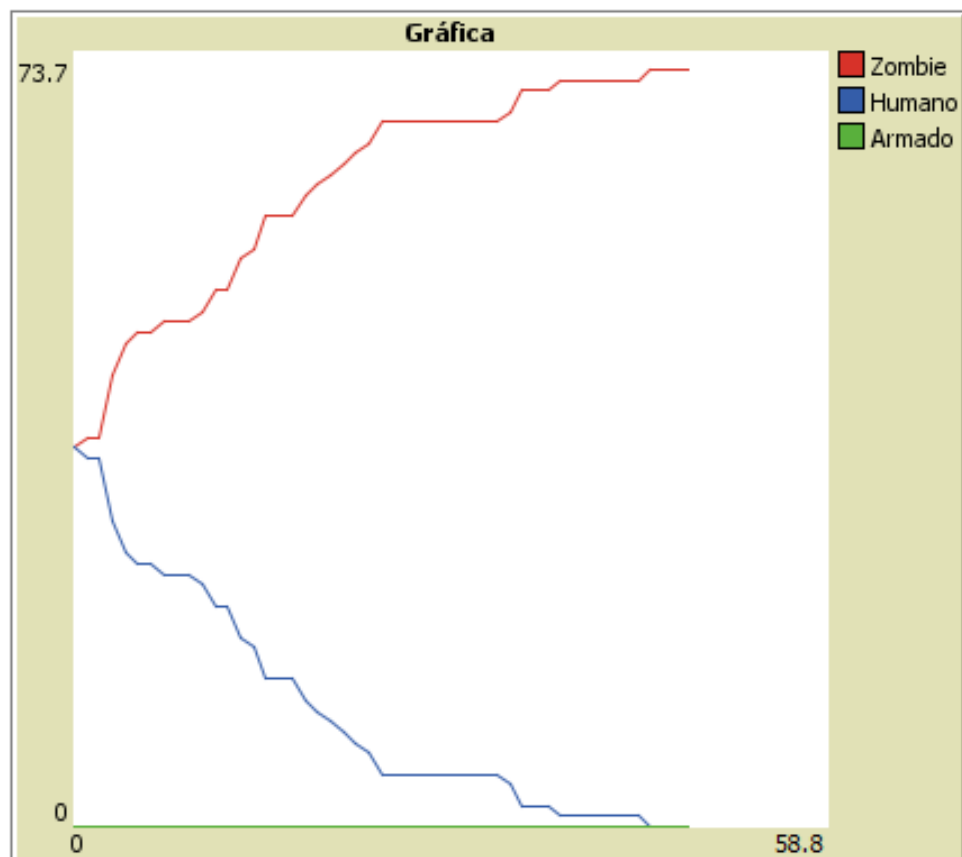
Humanos: 36  
Zombis: 36  
Velocidad Zombi: 6  
Velocidad Humano: 4  
Visión Zombi: 2  
Visión Humano: 4  
Arma Recogida: 10  
Puntería: 80%



**Figura 6.22** Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, Zombis más inteligentes.  
Fuente: Propia.

En esta simulación vemos que el día 33 los humanos quedan exterminados, ese día quedan un total de 55 Zombis, vemos que los Humanos Armados han conseguido defenderse venciendo a algunos Zombis.

Otra simulación con los mismos valores:

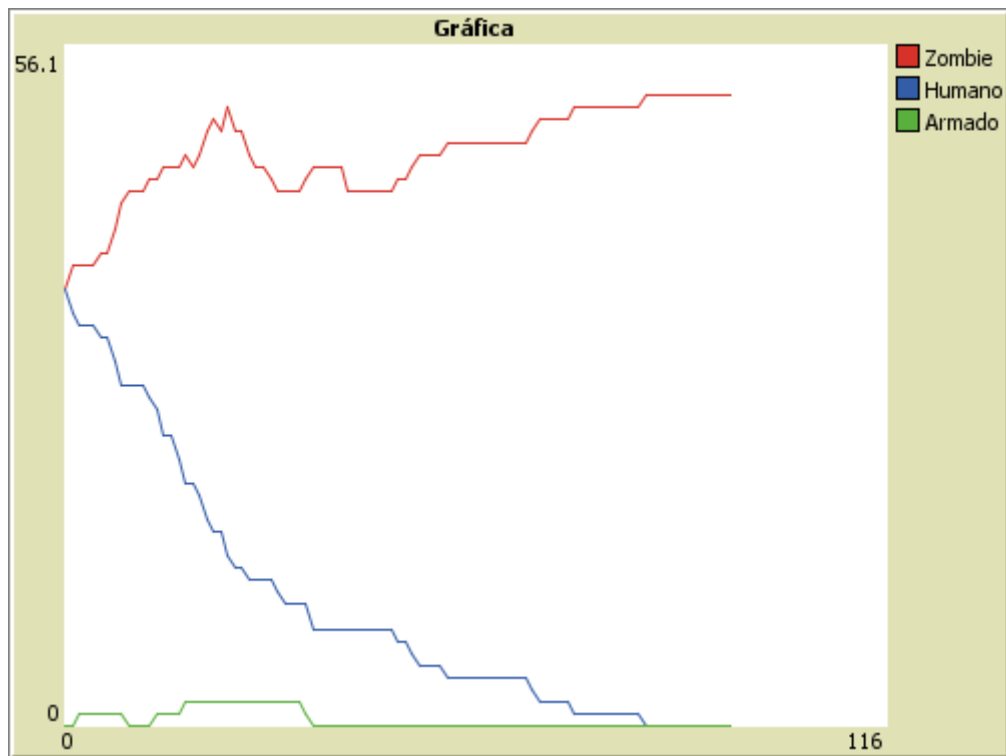


**Figura 6.23** Gráfico alternativo resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, Zombis más inteligentes. Fuente: Propia.

En esta ocasión los humanos sobreviven hasta el día 45 y quedan en total 72 Zombis, ningún humano consigue amarse y eliminar a un Zombi.

Vemos que la superioridad de velocidad de los Zombi es crucial para la victoria sobre los humanos, por lo que probaremos ahora con una velocidad similar.

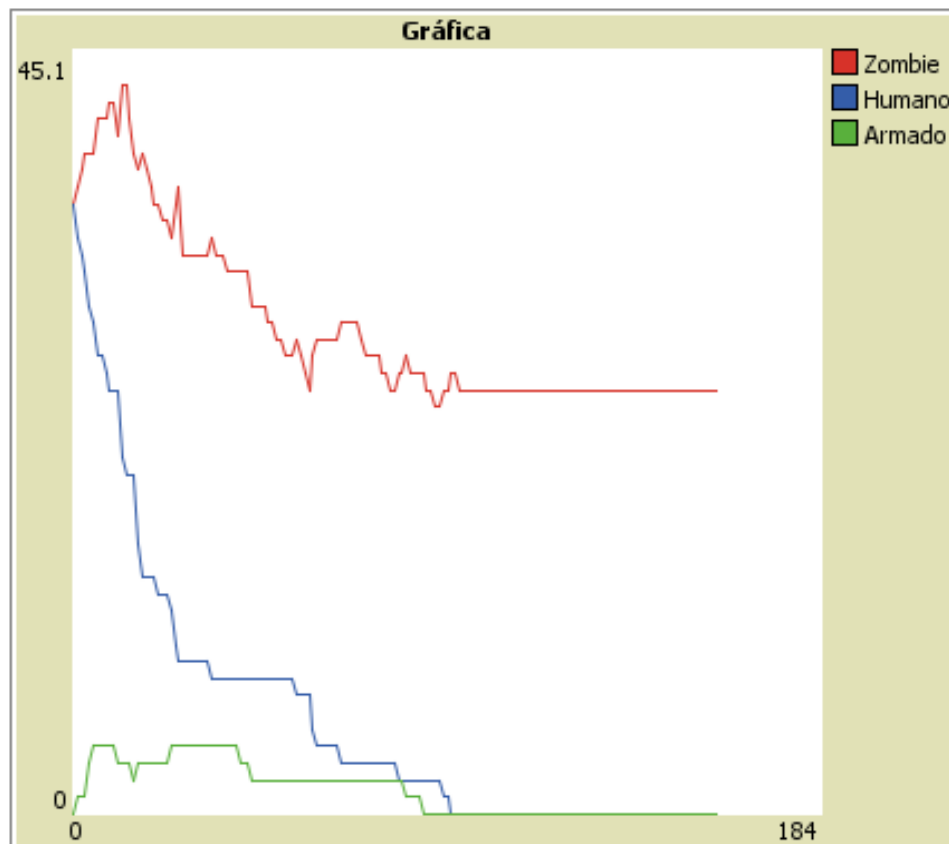
Humanos: 36  
Zombis: 36  
Velocidad Zombi: 4  
Velocidad Humano: 4  
Visión Zombi: 2  
Visión Humano: 4  
Arma Recogida: 10  
Puntería: 80%



**Figura 6.24** Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, velocidades similares. Fuente: Propia.

En esta simulación los Zombis salen victoriosos, el día 82 se observa que no queda ningún Humano y aproximadamente 51 Zombis.

Otra simulación con los mismos valores, nos da esta gráfica:



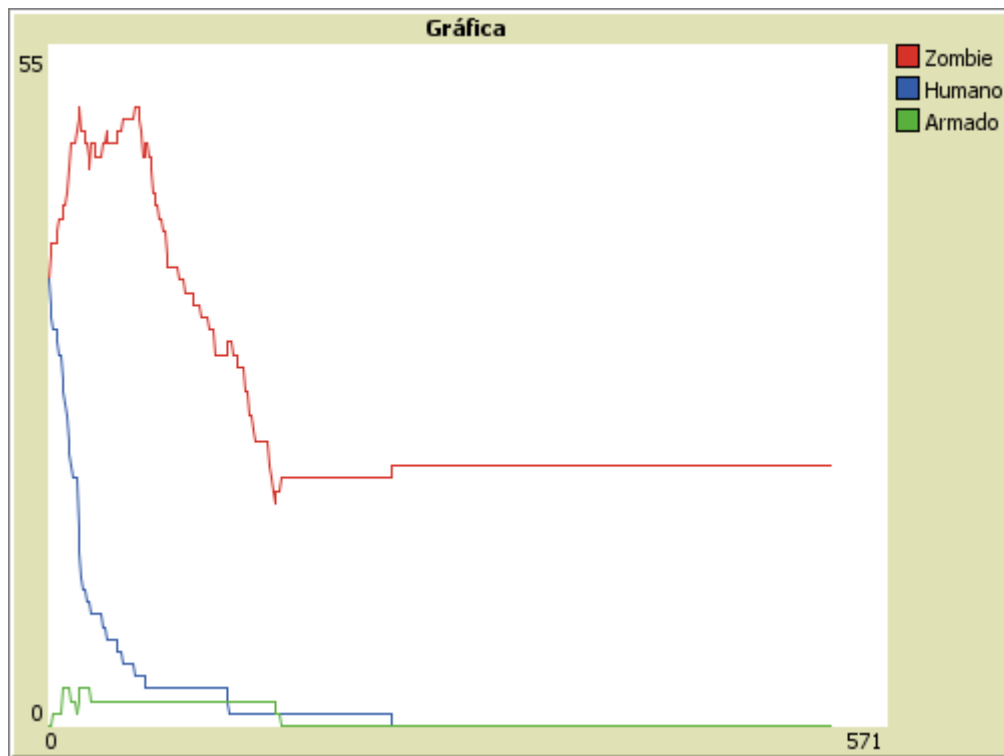
**Figura 6.25** Gráfico alternativo resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, velocidades similares. Fuente: Propia.

En esta ocasión los humanos sobreviven hasta el día 93 y quedarían 25 Zombis.

En la siguiente simulación vamos a dar a los humanos armados más capacidad de puntería, para comprobar si de esta manera los Humanos salen victoriosos:

Humanos: 36  
Zombis: 36  
Velocidad Zombi: 4  
Velocidad Humano: 4  
Visión Zombi: 2  
Visión Humano: 4  
Arma Recogida: 10  
Puntería: 100%

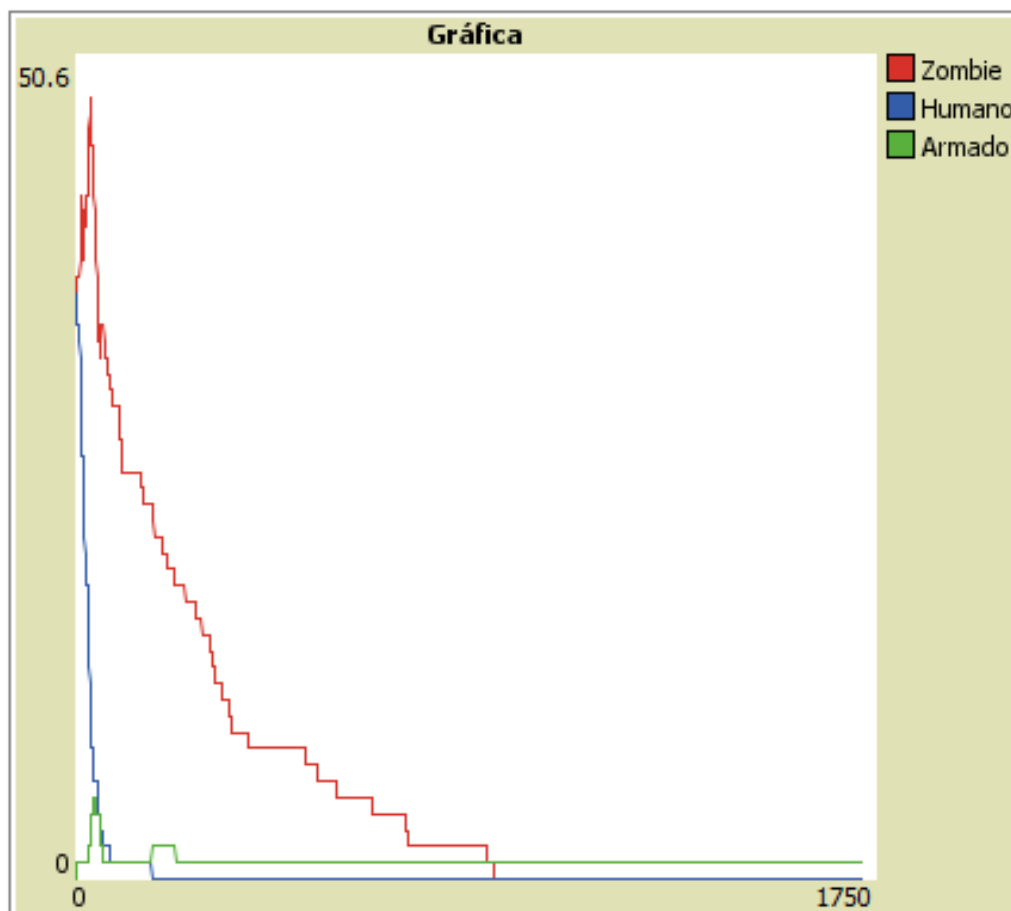




**Figura 6.26** Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, humanos más puntería.  
Fuente: Propia.

En esta simulación los Zombis vuelven a infectar a todos los humanos, el día 234 quedan en total 21 Zombis y ningún humano.

Repitiendo la simulación con los mismos valores, obtenemos la siguiente gráfica:

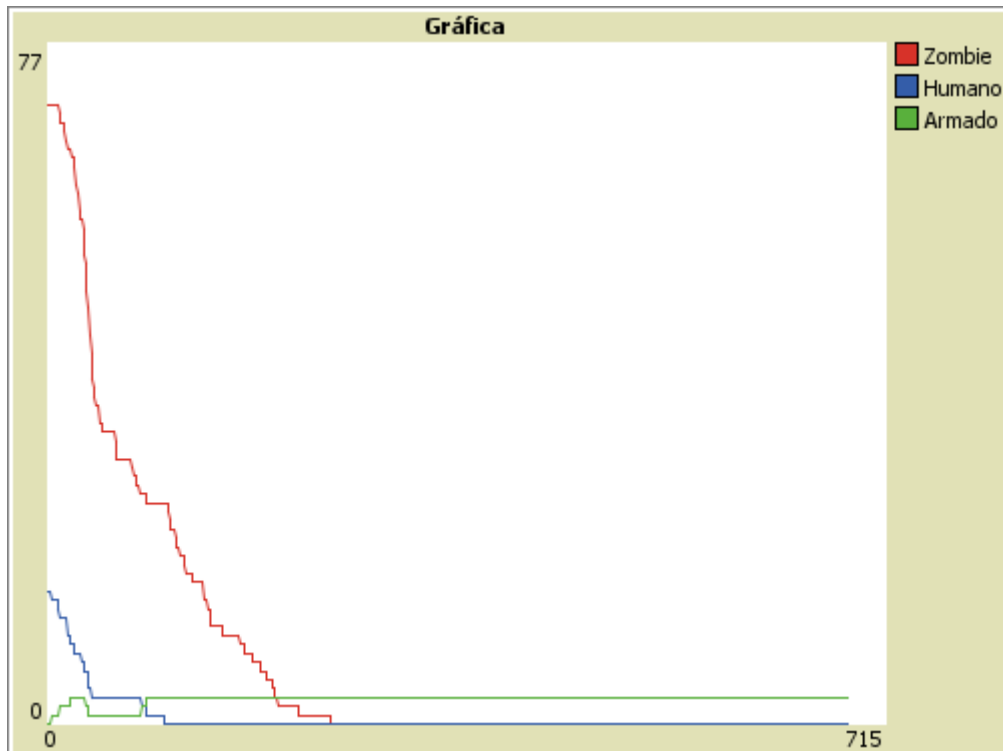


**Figura 6.27** Gráfico alternativo resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, humanos más puntería. Fuente: Propia.

Esta ocasión vemos que los humanos resultan vencedores, el día 914 no queda ningún Zombi y sobrevive un humano armado.

Ahora vamos a simular una situación de contra ataque muy tardía, donde ya el ejército entra en acción, para esta situación usaríamos los siguientes parámetros.

Humanos: 15  
Zombis: 70  
Velocidad Zombi: 2  
Velocidad Humano: 9  
Visión Zombi: 1  
Visión Humano: 5  
Arma Recogida: 10  
Puntería: 100%



**Figura 6.28** Gráfico resultante del simulador en Fase Contra Ataque tardía, ejercito en acción. Fuente: Propia.

En esta simulación vemos como los humanos saldrían victoriosos, el día 241 los Zombies quedarían exterminados y habrían sobrevivido 3 Humanos.

### 6.5.3 SIMULACIONES NETLOGO-FILMOGRAFÍA

A continuación, vamos a utilizar el simulador para comparar los resultados que obtuvo Adrià Molina del análisis de algunos films [26], donde aplicó ecuaciones para obtener resultados.

#### 28 días después

Empezaremos con el análisis del Film 28 días después, Adrià en su análisis determinó las siguientes variables para las ecuaciones que veremos más adelante y valores después de visionar la película:

$\beta$ : Representa la probabilidad de que un infectado contagie a un susceptible tras un encuentro entre ambos.

$\sigma$ : Representa la probabilidad de que un infectado mate a un susceptible, tras un encuentro entre ambos.

$\mu$ : Representa la probabilidad de que un susceptible mate a un infectado, tras un encuentro entre ambos.

$\gamma$ : Representa el tiempo promedio de infección (más concretamente  $1/\text{duración de la infección}$ );

Valores:

$(0) = 57.656.943$ ,  $(0) = 1$  y  $(0) = 0$

$\beta = 0,9$

$\sigma = 0,05$

## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa Edson Flores Rosales

$$\mu = 0,2$$
$$\gamma = 1 / 56$$

Teniendo en cuenta que el simulador es genérico y no puede adaptarse a cada film podemos aproximar los valores de este a los del film, por lo que podemos usar los siguientes valores en el simulador para comparar resultados:

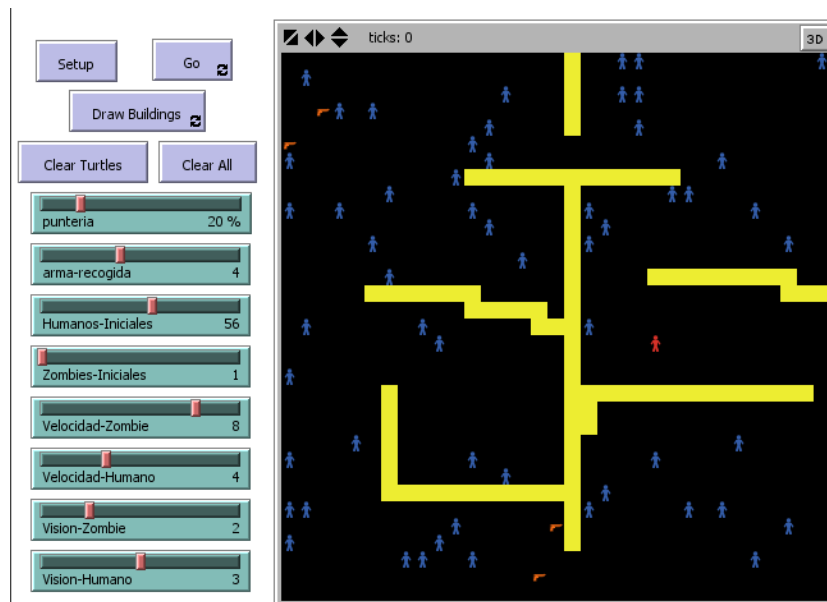
Humanos Iniciales: 56  
Zombis iniciales: 1  
Velocidad Zombi: 8  
Velocidad Humano: 4  
Visión Zombi: 2  
Visión Humano: 3  
Puntería: 20  
Arma recogida: 4

La probabilidad de que un infectado mate a un susceptible es algo particular de este film, para este caso no lo tendremos en cuenta, pero podemos adaptar los valores de velocidad y visión para acercarnos lo máximo posible ya que lo que queremos observar la capacidad del ser humano de sobrevivir con los valores obtenidos del film y realizar la comparación.

La probabilidad de que un susceptible mate a un infectado queda representado por arma recogida y puntería.

El film está ambientado en una ciudad de Gran Bretaña como es Londres, por lo que hay edificaciones, por lo que podemos configurar en el simulador construcciones y así obtener resultados más fiables.

El escenario que presenta el simulador para este film es el siguiente:

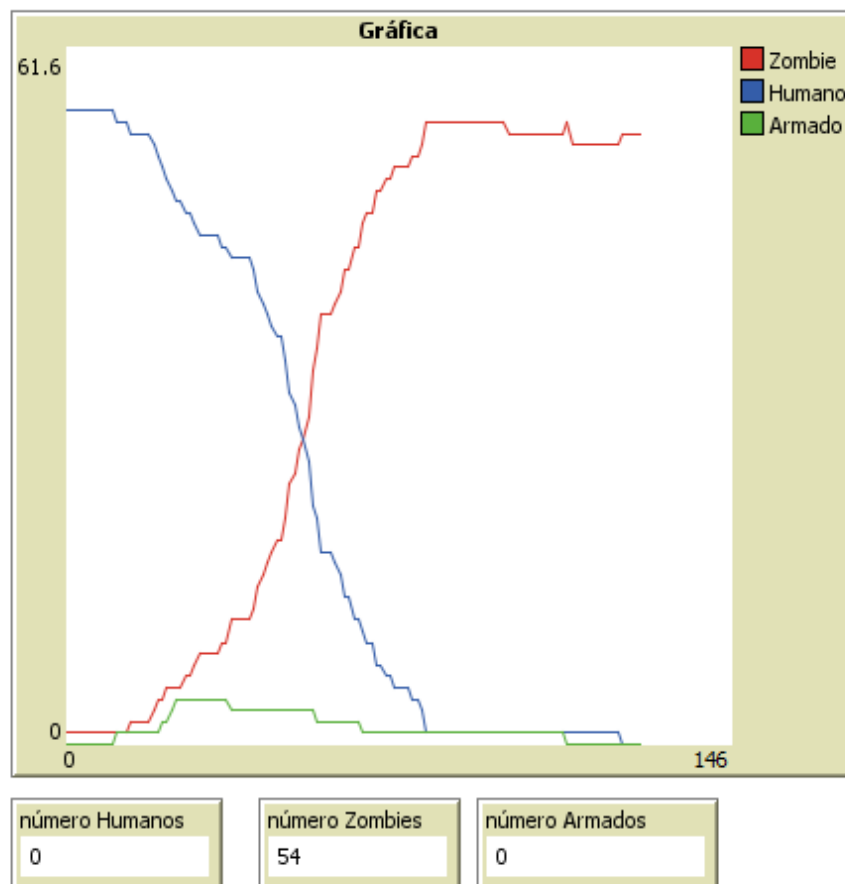


**Figura 6.29** Escenario Inicial 28 días después en Simulador. Fuente: Propia.

## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa

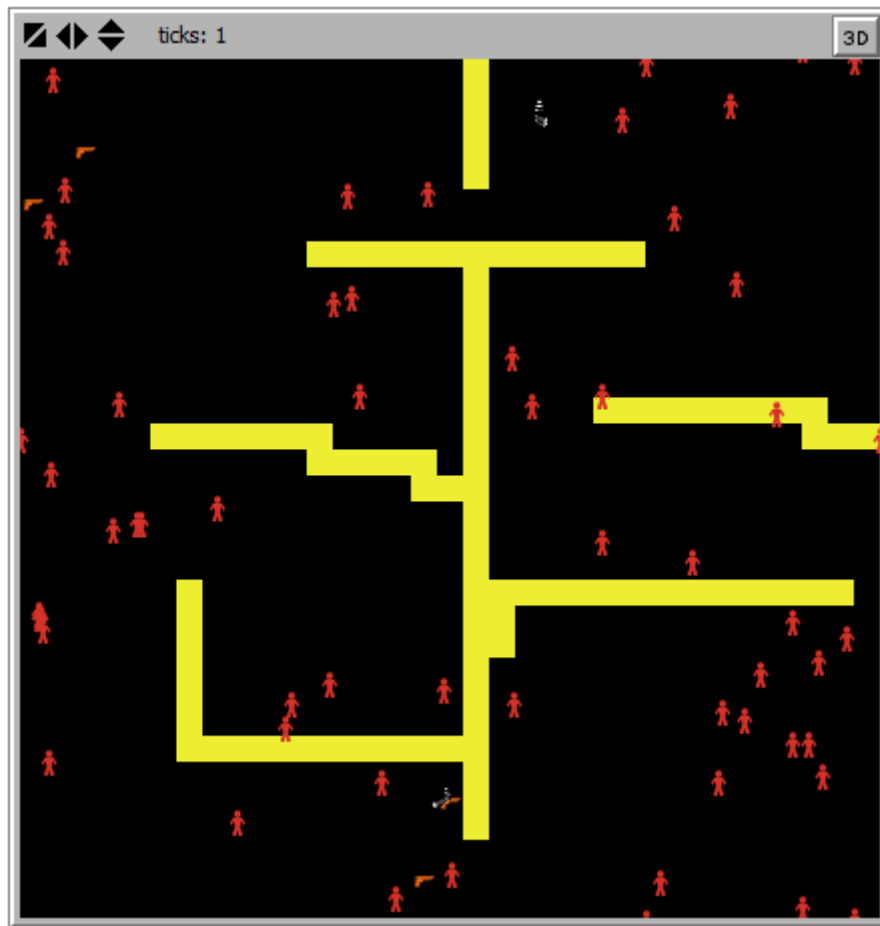
Edson Flores Rosales

Después de la simulación obtenemos los siguientes resultados:



**Figura 6.30** Gráfico resultante en Simulador, 28 días después. Fuente: Propia.

Observamos que después de 79 días prácticamente la humanidad está completamente infectada con solo 2 supervivientes y hasta el día 120 no queda totalmente infectada la humanidad. Otro dato interesante que vemos es que el día 34 la cantidad de Infectados y Susceptibles se iguala.



**Figura 6.31** Escenario Final 28 días después en Simulador. Fuente: Propia.

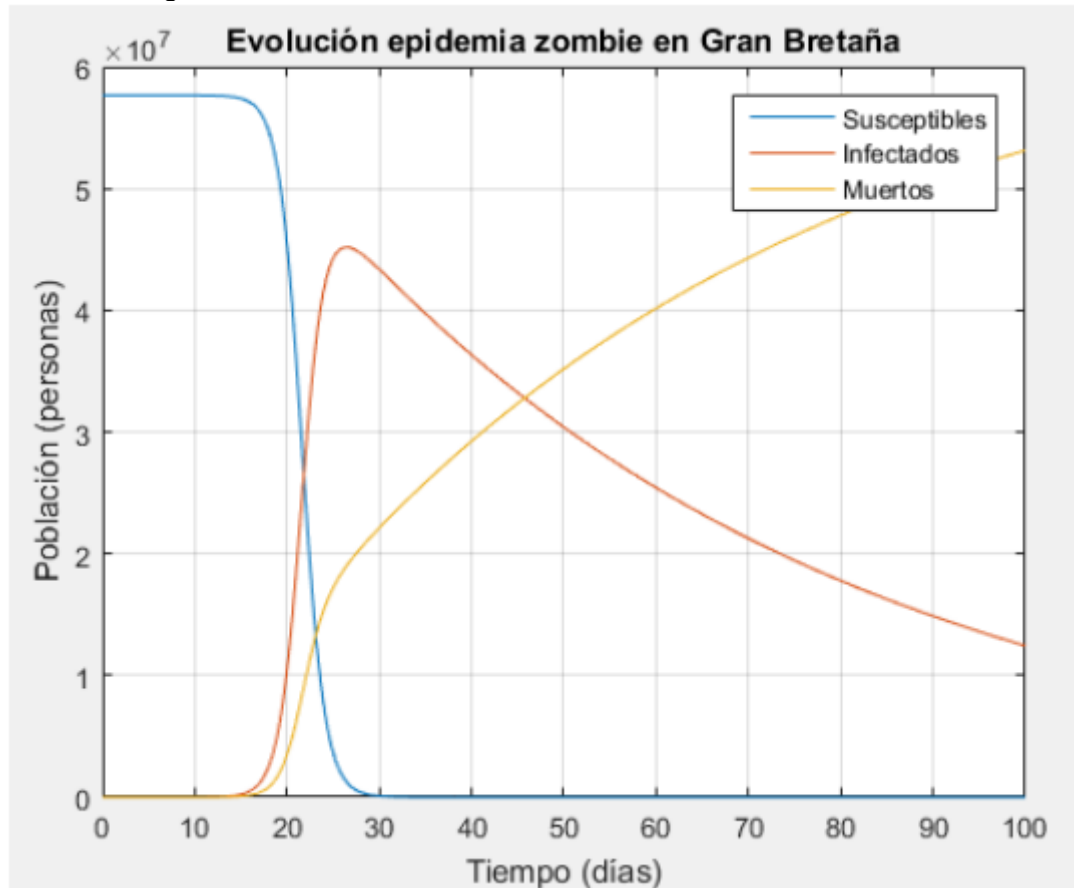
Adrià a partir del siguiente modelo matemático:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{SI}{N} - \sigma \frac{SI}{N}$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta \frac{SI}{N} - \mu \frac{SY}{N} - \gamma I$$

$$\frac{dM}{dt} = \gamma I + \sigma \frac{SI}{N} + \mu \frac{SY}{N}$$

Obtuvo el siguiente resultado:

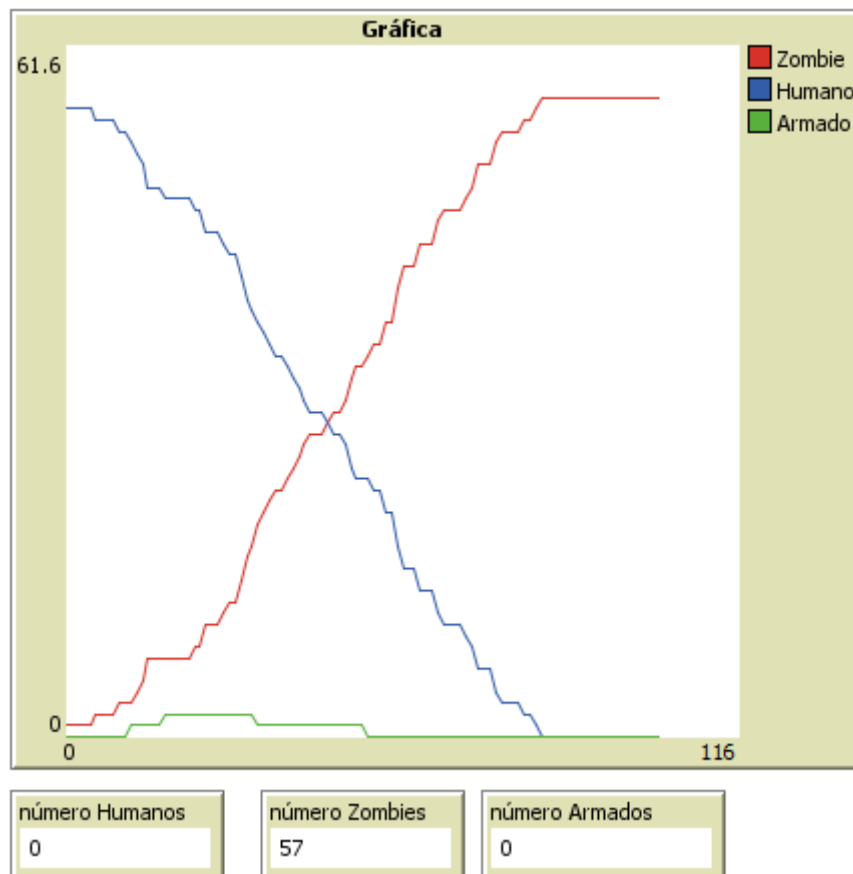


**Figura 6.32** Gráfico resultante mediante ecuaciones de 28 días después. Fuente: [26].

Comparando resultados observamos que, en la gráfica (figura 6.32) de Adrià [26] donde en el vigésimo octavo día aproximadamente el 0,6% de la población inicial, podemos darnos cuenta de que el simulador es mucho menos pesimista ya que esto no pasa hasta el día 79.

En la gráfica de Adrià no queda ningún susceptible a partir del día 30 y con el simulador esto no pasa hasta el día 120. Lo que si podemos notar es un resultado similar en ambos casos en cuanto a la supervivencia del ser humano, que es poca o nula, la humanidad no puede hacer frente a la epidemia Zombi y queda totalmente infectada.

Dado que el simulador usa agentes vivos, puede obtener diferentes resultados usando lo mismo valores en cada ejecución como, por ejemplo:



**Figura 6.33** Gráfico alternativo resultante en Simulador, 28 días después. Fuente: Propia.

En esta ocasión vemos que el final para la humanidad es el mismo, queda totalmente infectada, pero vemos que el número de zombis y susceptibles no se iguala hasta el día 45, mientras los humanos quedan totalmente infectados el día 82.

En esta ocasión el simulador ha arrojado un resultado más pesimista que la anterior ejecución del simulador, aunque no tanto como el resultado obtenido a partir del modelo matemático de Adrià.



## **Bienvenidos a Zombieland**

Continuamos con el análisis del film Bienvenidos Zombieland, Adrià en su análisis determinó las siguientes variables para las ecuaciones que veremos más adelante y valores después de visionar la película:

$\beta$ : Representa la probabilidad de que un infectado contagie a un susceptible tras un encuentro entre ambos.

$\sigma$ : Representa la probabilidad de que un infectado mate a un susceptible, tras un encuentro entre ambos.

$\mu$ : Representa la probabilidad de que un susceptible mate a un infectado, tras un encuentro entre ambos

Valores:

$$(0) = 665$$

$$(0) = 308,8 * 10^6$$

$$\beta = 0,7$$

$$\sigma = 0,15$$

$$\mu = 0,05$$

Teniendo en cuenta que el simulador es genérico, puede aproximarse a cada film jugando con los valores de este y así sea lo más semejante posible, algunos valores no se podrán controlar ya que cada película juega con factores particulares que la hacen única, pero los valores comunes el simulador los controla.

Por lo que podemos usar los siguientes valores en el simulador para comparar resultados:

Humanos Iniciales: 31

Zombis iniciales: 7

Velocidad Zombi: 7

Velocidad Humano: 4

Visión Zombi: 2

Visión Humano: 3

Puntería: 15

Arma recogida: 2

El film está ambientado en Texas a Beverly Hills en Estado Unidos, según las escenas una zona no muy edificada, por lo que podemos configurar en el simulador construcciones y así obtener resultados más fiables.

El escenario que presenta el simulador para este film es el siguiente:

Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa  
Edson Flores Rosales

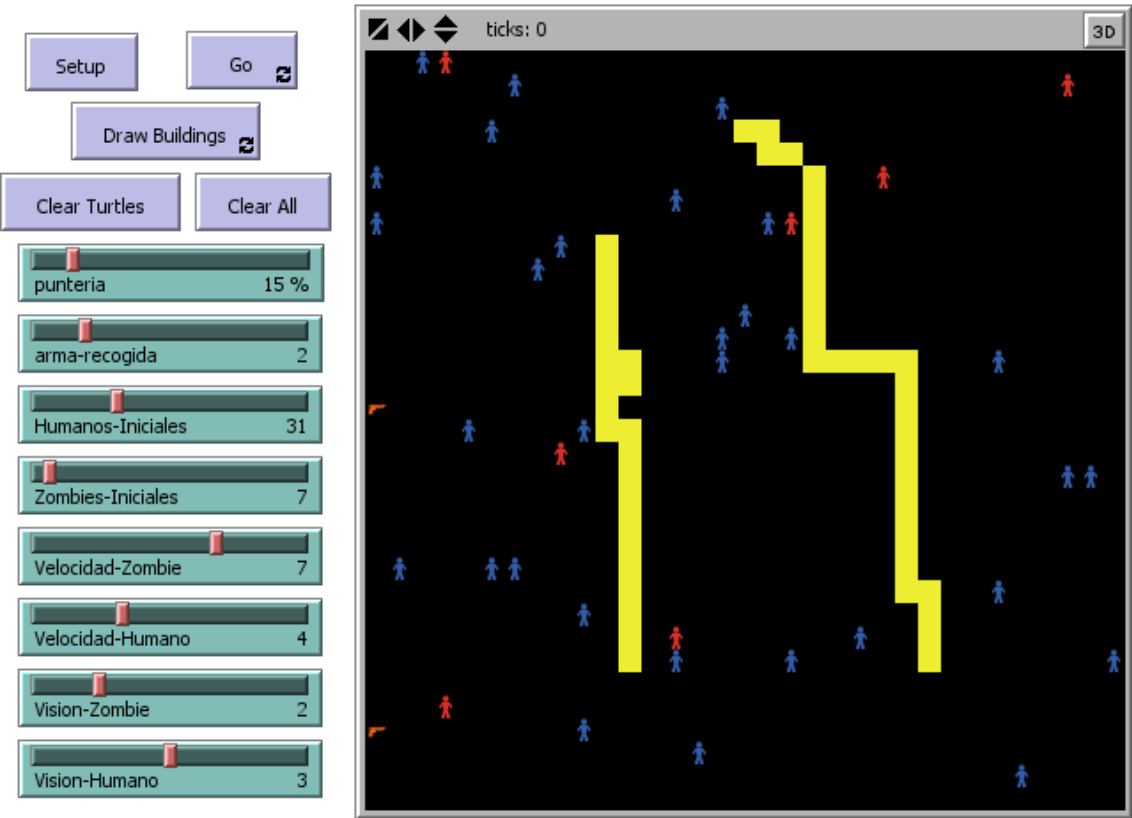


Figura 6.34 Escenario Inicial Bienvenidos a Zombieland en Simulador. Fuente: Propia.

Después de la simulación obtenemos los siguientes resultados:

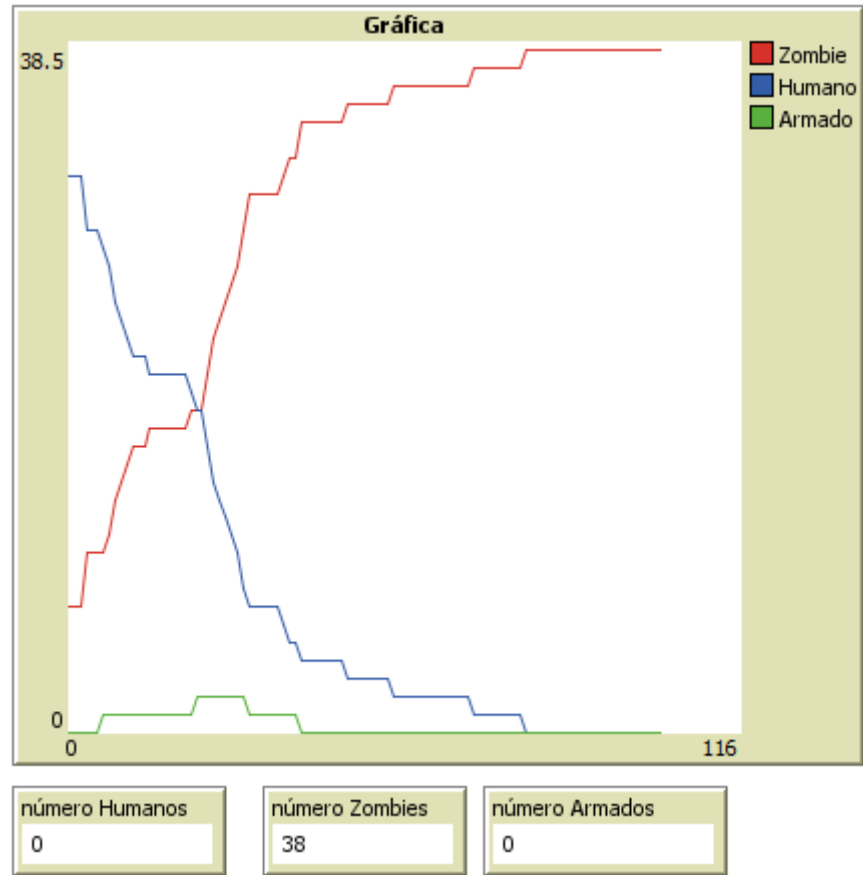
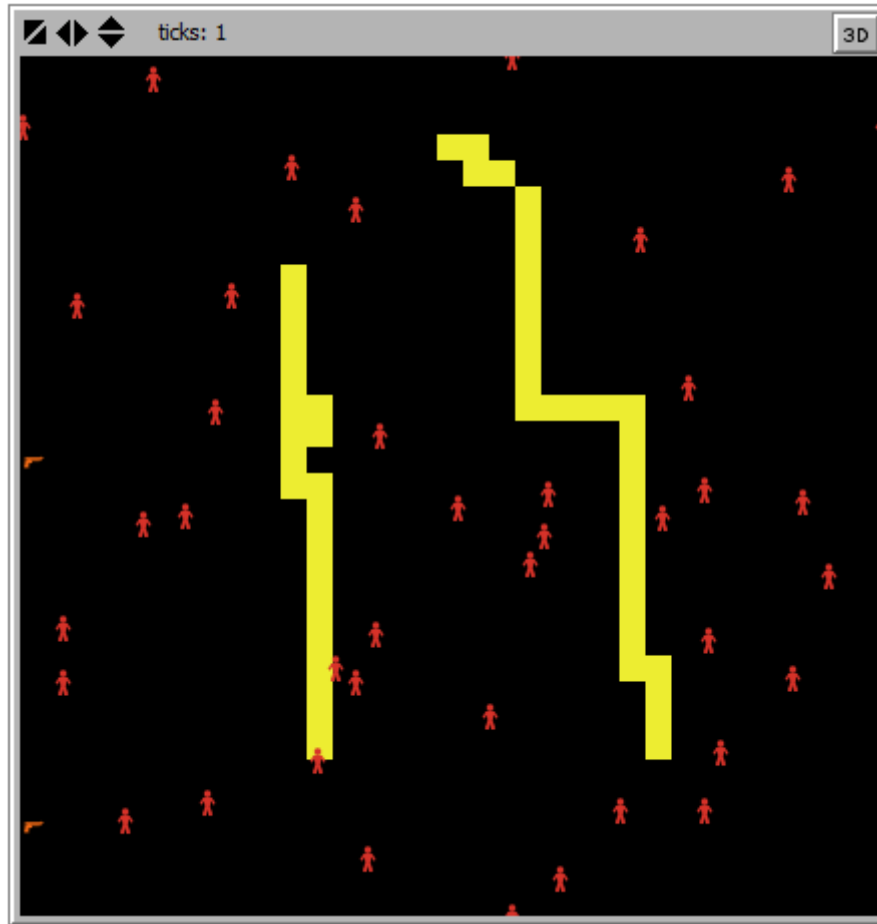


Figura 6.35 Gráfico resultante en Simulador, Bienvenidos a Zombieland. Fuente: Propia.

Observamos que después de 70 días prácticamente la humanidad está completamente infectada y hasta el día 80 no queda totalmente infectada la humanidad. Otro dato interesante que vemos es que el día 22 la cantidad de Infectados y Susceptibles se iguala.



**Figura 6.36** Escenario Final Bienvenidos a Zombiland en Simulador. Fuente: Propia.

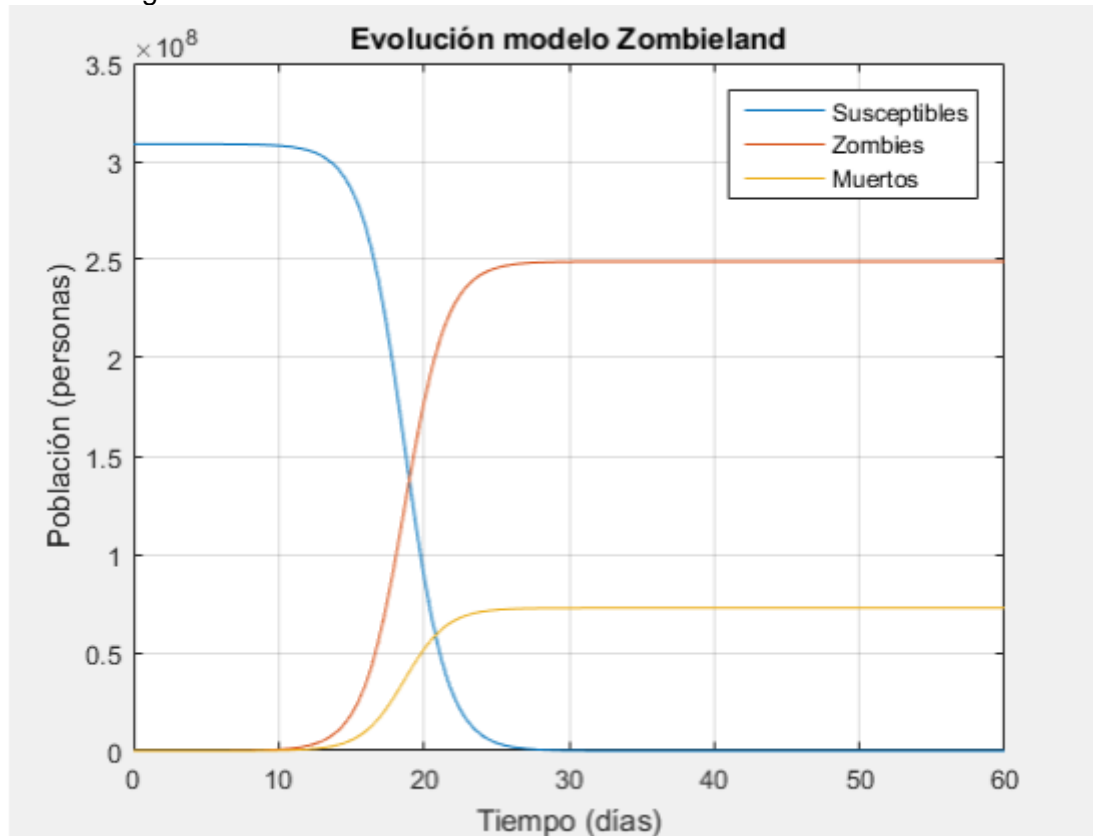
Adrià [26] a partir del siguiente modelo matemático:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{SI}{N} - \sigma \frac{SI}{N}$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta \frac{SI}{N} - \mu \frac{SI}{N}$$

$$\frac{dM}{dt} = \sigma \frac{SI}{N} + \mu \frac{SI}{N}$$

Obtuvo el siguiente resultado:

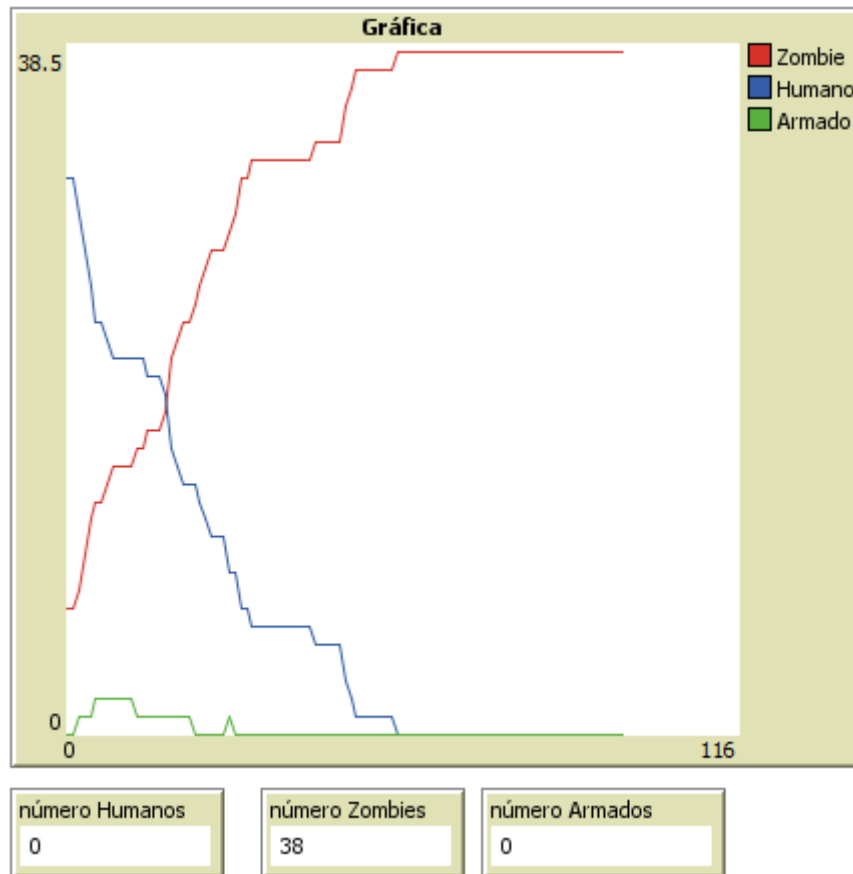


**Figura 6.37** Gráfico resultante mediante ecuaciones de Bienvenidos a Zombieland. Fuente: [26].

Comparando resultado observamos que es bastante agresivo ya que a partir del día 25 la humanidad está casi extinguida, y en el día 60 no quedan supervivientes, esto es algo que con el simulador no pasa hasta el día 70 y 80 respectivamente. Podemos ver que el simulador no es tan pesimista.

Lo que si podemos notar es un resultado similar en ambos casos en cuanto a la supervivencia del ser humano, que es poca o nula, la humanidad no puede hacer frente a la epidemia Zombi y queda totalmente infectada.

Dado que el simulador usa agentes vivos, puede obtener diferentes resultados usando lo mismo valores en cada ejecución como, por ejemplo:



**Figura 6.38** Gráfico alternativo resultante en *Simulador, Bienvenidos a Zombieland*. Fuente: Propia.

En esta ocasión vemos que el final para la humanidad es el mismo, queda totalmente infectada, pero vemos que el número de zombis y susceptibles no se iguala hasta el día 17, mientras los humanos quedan totalmente infectados el día 58.

En esta ocasión el simulador ha arrojado un resultado más pesimista que la anterior ejecución del simulador, aunque no tanto como el resultado obtenido a partir del modelo matemático de Adrià [26].

### La noche de los muertos vivientes

Seguimos con el análisis de la película de George A. Romero, *La noche de los muertos vivientes*. Adrià en su análisis determinó las siguientes variables para las ecuaciones que veremos más adelante y valores después de visionar la película:

$n$ : Representa la tasa de natalidad mundial diaria por número de susceptibles.

$m$ : Representa la tasa de mortalidad mundial diaria, por causas ajenas a los zombis, por número de susceptibles.

$\beta$ : Representa la probabilidad de que un susceptible muera tras el encuentro entre este y un zombi.

$\alpha$ : Representa la probabilidad de que un susceptible sea comido por un zombi tras un encuentro entre ambos.

$\mu$ : Representa la probabilidad de que un zombi muera tras el encuentro entre este y un susceptible.

## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa

Edson Flores Rosales

Valores:

$$n=8,2*10^{-5}$$

$$m=3,3*10^{-5}$$

$$\beta=0,35$$

$$\alpha=0,2$$

$$\mu=0,2$$

$$(0)=3,5*10^9$$

$$(0)=0$$

$$(0)=0$$

En este caso en concreto no tendremos en cuenta la tasa de natalidad y mortalidad. Podemos usar los siguientes valores en el simulador para comparar resultados:

Humanos Iniciales: 35

Zombis iniciales: 1

Velocidad Zombi: 3

Velocidad Humano: 4

Visión Zombi: 3

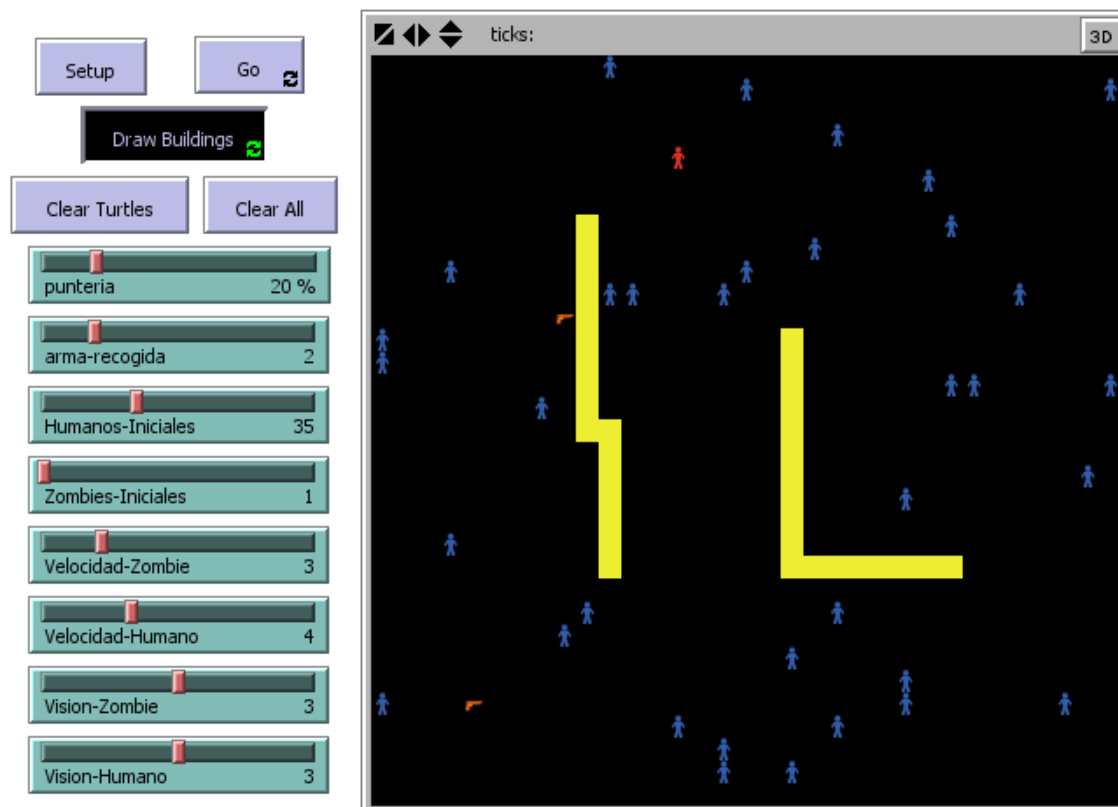
Visión Humano: 3

Puntería: 20%

Arma recogida: 2

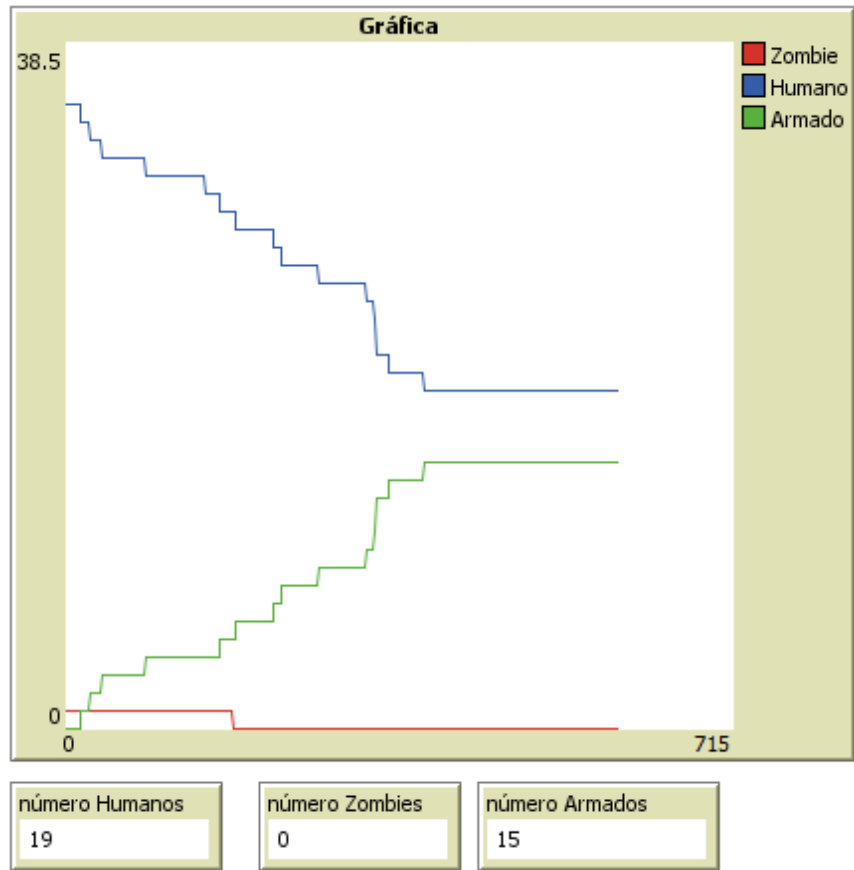
El film está ambientado en una zona rural de Estado Unidos, según las escenas una zona no muy edificada, por lo que podemos configurar en el simulador con pocas construcciones y así obtener resultados más fiables.

El escenario que presenta el simulador para este film es el siguiente:



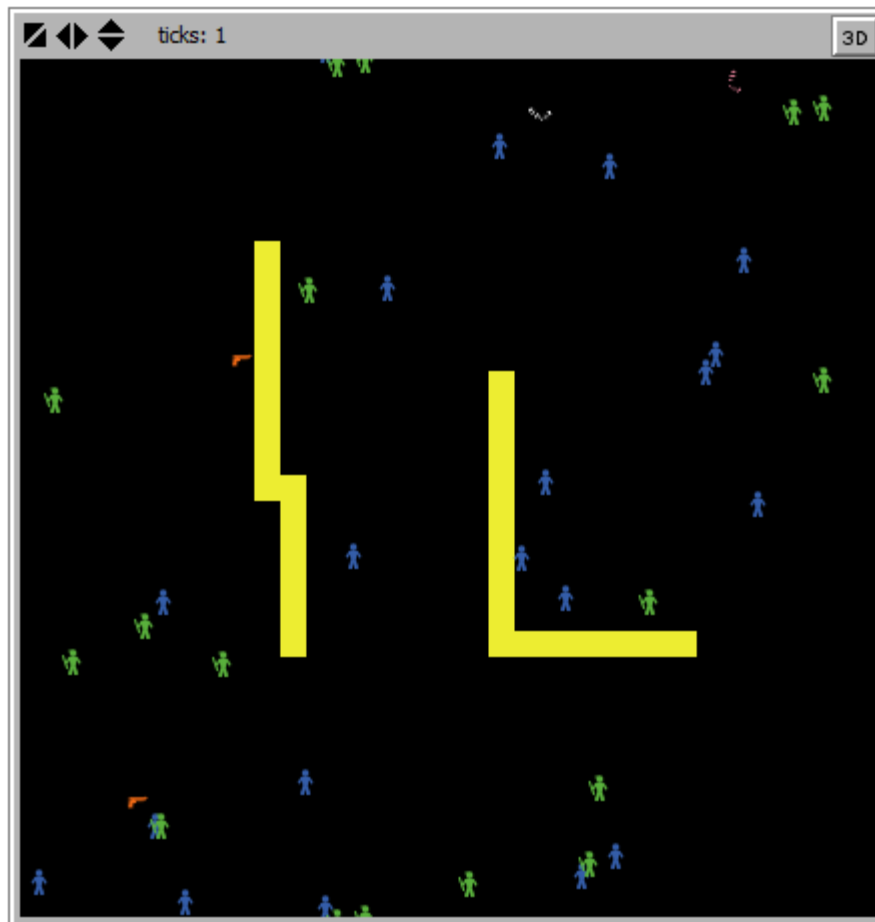
**Figura 6.39** Escenario Inicial La noche de los muertos vivientes en Simulador. Fuente: Propia.

Después de la simulación obtenemos los siguientes resultados:



**Figura 6.40** Gráfico resultante en Simulador, La noche de los muertos vivientes. Fuente: Propia.

Observamos que después del día 180 días la humanidad ha vencido y no hay ningún nuevo infectado.



**Figura 6.41** Escenario Final La noche de los muertos vivientes en Simulador. Fuente: Propia.

Adrià [26] a partir del siguiente modelo matemático:

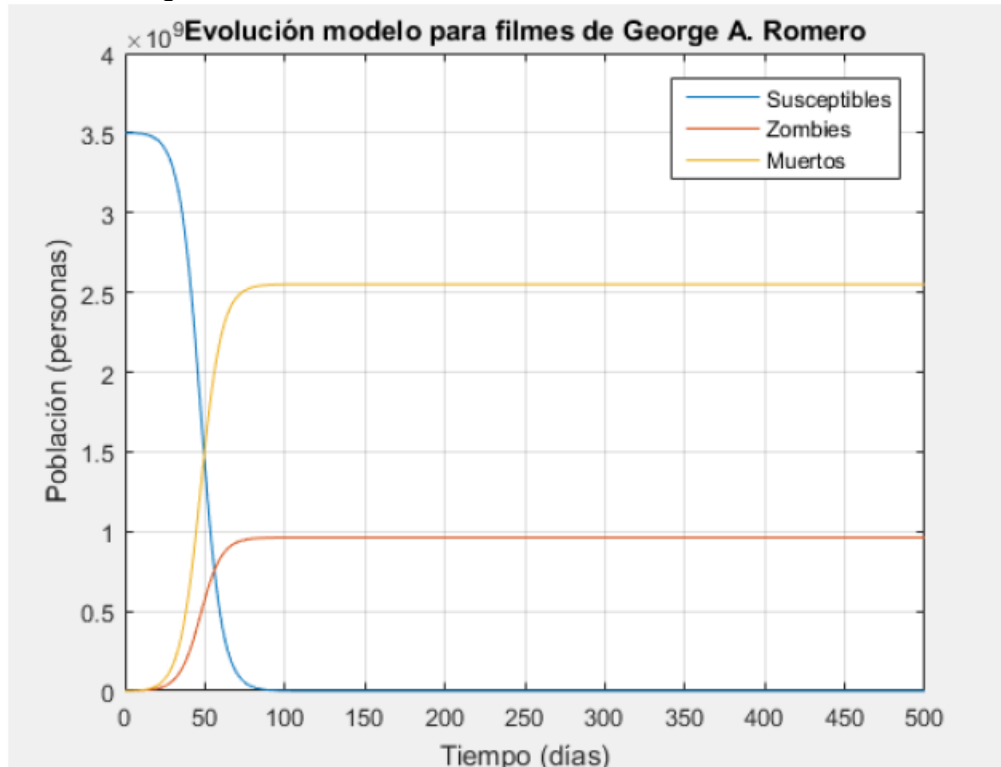
$$\frac{dS}{dt} = S * n - S * m - \beta \frac{SZ}{N} - \alpha \frac{SZ}{N}$$

$$\frac{dZ}{dt} = S * m + \beta \frac{SZ}{N} - \mu \frac{SZ}{N}$$

$$\frac{dD}{dt} = \alpha \frac{SZ}{N} + \mu \frac{SZ}{N}$$



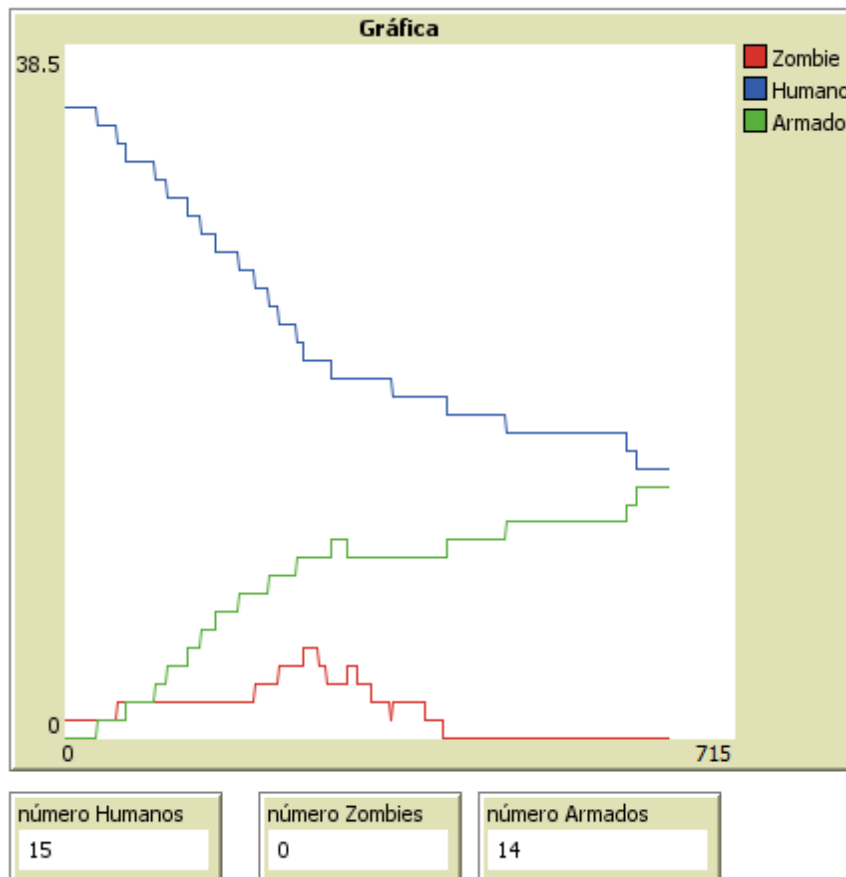
Obtuvo el siguiente resultado:



**Figura 6.42** Gráfico resultante mediante ecuaciones *La noche de los muertos vivientes*. Fuente: [26].

Comparando resultado observamos una diferencia bastante obvia, usando el modelo de ecuaciones el fin de la humanidad es muy pesimista y queda totalmente infectada el día 200, mientras que en el simulador el día 180 la humanidad se libra del único Zombi y no hay ninguna nueva infección por el virus.

Dado que el simulador usa agentes vivos, puede obtener diferentes resultados usando los mismos valores en cada ejecución como, por ejemplo:



**Figura 6.43** Gráfico alternativo resultante en *Simulador, La noche de los muertos vivientes*. Fuente: Propia.

En esta ocasión volvemos a ver como la humanidad sale victoriosa, aunque con algo más de dificultades ya que hay nuevas infecciones, el día 255 llega al tope de infectados con 5 zombis y los susceptibles no acaban con ellos hasta el día 404.

El resultado del simulador esta vez ha sido más pesimista, pero sin llegar al nivel del resultado de Adrià [26] con el modelo matemático.

#### 4.5.4 CONCLUSIONES

Podemos extraer como conclusión que, sin una forma de defensa, los humanos solo pueden escapar y más tarde o más temprano los Zombies acabarían por infectarlos. También observamos en las diferentes simulaciones que el factor de velocidad es muy importante, dado que, pese a que la visión es un parámetro también a tener en cuenta, si un Zombi se mueve muy deprisa tiene más posibilidad de encontrarse con un humano e infectarlo, incluso también de esquivar un disparo.

Otro aspecto a tener en cuenta es el número de Zombis en un instante de tiempo, ya que a pesar de que el humano pueda armarse, si es muy elevado el número de Zombis la posibilidad de que un humano pueda armarse es más limitada.

Vemos también que el uso de ABM nos puede arrojar distintos resultados, esto se asemeja más a la realidad ya que las simulaciones usando agentes abarca muchas posibilidades que solo usando unas ecuaciones, esto es una ventaja que permite visualizar de mejor forma todos los posibles resultados. A modo de continuación sería útil añadir más parámetros a tener en cuenta en los humanos y en los zombis para observar los posibles resultados según los valores de estos nuevos parámetros.

## CONCLUSIONES FINALES

Los modelos de Munz están hechos en base a la ficción, modelos muy pesimistas para dar juego a las películas. Como hemos podido comprobar en la realidad no se adaptan bien estos modelos, por un lado, porque sería complicado poner en práctica algunas medidas como se haría en el modelo de erradicación impulsiva en caso de una infección vírica real, pero sí que deja ver que, aunque de forma pesimista cómo puede afectar una infección.

Como hemos visto el modelo SIR, puede ser ampliado para tener en cuenta más aspectos, en este caso hemos tenido en cuenta aspectos geográficos que pueden mermar el paso de los Zombis.

En cuanto un análisis más correcto de una infección en una población, también nos hemos dado cuenta la necesidad de analizar de forma más minuciosa la población para poder predecir como afectara según las distintas capacidades físicas de un individuo y sus características, como hemos visto en este trabajo una población más joven o con más recursos armamentísticos podrá defenderse mejor ante una epidemia Zombi, que sería lo equivalente ante una infección real en recursos médicos o estudios sobre epidemias reales.

En cuanto al simulador desarrollado, que es una de las aportaciones más claras en este trabajo, ya que anteriormente Adrià [26] no mencionó y como hemos visto es una buena forma extender y analizar la temática de una epidemia Zombi ya que usa Agentes Libres que amplía mucho las perspectivas de estudio, y usado para hacer las pruebas con agentes inteligentes, hemos visto la posibilidad de ver la diversidad de resultados que nos puede dar esta forma de hacer pruebas cuando tratamos individuos que se pueden comportar de “infinitas” formas, algo que difícil de definir en las ecuaciones.

Con todo lo comentado anteriormente hemos comprobado la funcionalidad de los modelos de Munz en la realidad, uno de los modelos, el de erradicación impulsiva, hemos visto que puede ser mejorado (Modelo para la interacción Humano-Zombi) para obtener unos resultados más satisfactorios, ya que este modelo presenta un avance casi lineal y la realidad es diferente. Hemos visto como se podría mejorar dividiendo en fases una epidemia como en [10], un trabajo reciente que hemos compilado para analizarlo, que era uno de los objetivos a cumplir con este trabajo.

Otro objetivo cumplido ha sido con los resultados del modelo SIR con subpoblaciones separadas, durante el análisis de este modelo hemos visto la necesidad de introducir más parámetros para un mejor análisis.

Por otra parte, el simulador nos ha permitido comparar resultados obtenido mediante ecuaciones diferenciales y los obtenidos con agentes vivos (más realistas).

Este trabajo puede tener continuación, líneas futuras de desarrollo, tales como:

- Implementar en Matlab las mejoras añadidas a las ecuaciones del modelo de Subpoblaciones separadas geográficamente [2], también se podría ampliar estas mejoras teniendo en cuenta más parámetros como el clima de las zonas o tipo de vegetación en el camino.

- Otro aspecto a mejorar sería tener en cuenta la natalidad y la mortalidad de las regiones contiguas, hecho que no tratamos ya que mantenemos la idea inicial donde estos valores no afectan ya que el brote de infección es muy corto, de 100 días.

A modo de continuación de este trabajo se podría estudiar como añadir estas tasas para las regiones en brotes de infección de larga duración.

-Sería buen punto intentar analizar enfermedades en las que el humano no pudo intervenir con los modelos de Munz, salvo esperar que se detenga por si “sola” la enfermedad, como la peste negra en la edad medieval.

-En este trabajo se ha llegado a la conclusión que la mejor manera para superar una epidemia es con una vacuna, ya que una vez extendida es más complicado controlar “in situ”, otra forma de continuación sería analizar otras formas de erradicar la epidemia Zombi buscando una cura real y como se podría aplicar en Zombis ya infectados y agresivos, películas como “Soy Legenda” se trata un tema muy similar ya que el protagonista captura a un infectado para investigar con él una posible cura, sería una base ya que el inicialmente “está vacunado” ya que es inmune desde el inicio de la película y no se explica cómo adquiere esta inmunidad.

-En el modelo mejorado de Munz presentado en este trabajo (que divide la epidemia en varias etapas), sería conveniente probarlo con poblaciones subdesarrolladas, donde la población se reparte de manera muy diferente a la de los países occidentales desarrollados, además sería útil para ver cómo se desarrollaría una epidemia Zombi en una población muy joven como suelen ser las subdesarrolladas, pero con poco poder armamentístico.

-Tener en cuenta más tipos de Susceptibles y Zombis con sus diferentes parámetros, también la obtención de otro tipo de gráficas que puedan mostrar más variedad de resultados de forma visual, además de poder comparar resultados de distintas simulaciones en una misma gráfica.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Adrià Molina, ya que su trabajo me ha servido como base de continuación de mí, del cual he aprendido muchas cosas, además de que en el mismo trabajo hace consideraciones de continuación que me han servido de mucho.

También al director de este TFG, Manuel Moreno por la ayuda y paciencia mostrada durante la realización del trabajo.

## BIBLIOGRAFIA

[1] WIKIPEDIA. (2017) *Modelaje matemático de epidemias*.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Modelaje\\_matem%C3%A1tico\\_de\\_epidemias](https://es.wikipedia.org/wiki/Modelaje_matem%C3%A1tico_de_epidemias)  
[Consultado 10/05/2018].

[2] C.T. Davies, K.J. Cheshire, R. Garratley, J. Moore. A Zombi Epidemic.  
Department of Physics and Astronomy, University of Leicester, Leicester, LE1 7RH.  
November 22, 2016.  
<https://www108.lamp.le.ac.uk/ojs1/index.php/pst/article/view/885/817>  
[Consultado 10/05/2018].

[3] Philip Munz, Ioan Hudea, Joe Imad, Robert J. Smith?. When zombis attack!: Mathematical modelling of an outbreak of zombi infection. In: J.M. Tchenche and C. Chiyaka, editors, Infectious Disease Modelling Research Progress. Hauppauge (NY): Nova Science Publishers; 2009. pp. 133–50.  
[www.mathstat.uottawa.ca/~rsmith/Zombis.pdf](http://www.mathstat.uottawa.ca/~rsmith/Zombis.pdf)  
[Consultado 10/05/2018].

[4] John R. Paul MD. *EPIDEMIOLOGIA DE LA POLIOMIELITIS*. A History of Poliomyelitis. New Haven, Conn: Yale University Press, 1971.  
<http://hist.library.paho.org/Spanish/BOL/v40n6p521.pdf>  
[Consultado 18/05/2018].

[5] D. Kubryk. Paralytic Poliomyelitis Trends, Canada, 1958.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1831044/pdf/canmedaj00811-0015.pdf>  
[Consultado 18/05/2018].

[6] Medicina: Draco  
<https://vanguardia.com.mx/dracomedicinaquepodriaacabarconcuualquiertipodevirus-1069821.html>  
[Consultado 18/05/2018].

[7] WIKIPEDIA. Poliomiélitis  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Poliomiélitis>  
[Consultado 20/06/2018].

[8] WIKIPEDIA. Demografía Canadá  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Demograf%C3%ADa\\_de\\_Canad%C3%A1](https://es.wikipedia.org/wiki/Demograf%C3%ADa_de_Canad%C3%A1)  
[Consultado 20/06/2018].

[9] IBPINDEX  
<https://www.ibpindex.com/index.php/es/>  
[Consultado 20/06/2018].

[10] H. P. Langtangen, K.-A. Mardal and P. Røtnes, Escaping the zombi threat by mathematics. In: Zombis in the Academy - Living Death in Higher Education Chicago: University of Chicago Press, 2013.

<http://folk.uio.no/kent-and/zombis.pdf>

[Consultado 20/06/2018].

[11] WIKIPEDIA. Demografía España

[https://es.wikipedia.org/wiki/Demograf%C3%ADa\\_de\\_Espa%C3%B1a](https://es.wikipedia.org/wiki/Demograf%C3%ADa_de_Espa%C3%B1a)

[Consultado 03/07/2018].

[12] Nota Prensa, Instituto Nacional de Estadística (2008)

<https://www.ine.es/prensa/np524.pdf>

[Consultado 03/07/2018].

[13] WIKIPEDIA. Fuerza Armada España

[https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerzas\\_Armadas\\_Espa%C3%B1olas](https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerzas_Armadas_Espa%C3%B1olas)

[Consultado 03/07/2018].

[14] WIKIPEDIA. Cuerpo Policía Nacional

[https://es.wikipedia.org/wiki/Cuerpo\\_Nacional\\_de\\_Polic%C3%ADa](https://es.wikipedia.org/wiki/Cuerpo_Nacional_de_Polic%C3%ADa)

[Consultado 03/07/2018].

[15] WIKIPEDIA. Demografía Estados Unidos

[https://es.wikipedia.org/wiki/Demograf%C3%ADa\\_de\\_los\\_Estados\\_Unidos](https://es.wikipedia.org/wiki/Demograf%C3%ADa_de_los_Estados_Unidos)

[Consultado 03/07/2018].

[16] Disability Statistics Annual Report (2016)

[https://disabilitycompendium.org/sites/default/files/user-uploads/2016\\_AnnualReport.pdf](https://disabilitycompendium.org/sites/default/files/user-uploads/2016_AnnualReport.pdf)

[Consultado 19/07/2018].

[17] Fuerza Armadas Estados Unidos

[https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerzas\\_Armadas\\_de\\_los\\_Estados\\_Unidos](https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerzas_Armadas_de_los_Estados_Unidos)

[Consultado 19/07/2018].

[18] Artículo: Cantidad Policías

<https://www.infobae.com/2014/10/19/1602698-el-mapa-del-dia-los-paises-mas-cantidad-policias/>

[Consultado 19/07/2018].

[19] Demografía Islandia

[https://es.wikipedia.org/wiki/Demograf%C3%ADa\\_de\\_Islandia](https://es.wikipedia.org/wiki/Demograf%C3%ADa_de_Islandia)

[Consultado 19/07/2018].

[20] Artículo: Discapacitados en Islandia  
<https://grapevine.is/mag/feature/2012/08/16/you-cant-always-go-downtown/>  
[Consultado 19/07/2018].

[21] Nicolas Brodu. A Synthesis and Practical Approach to Complex System.  
Department of Computer Science and Software Engineering Concordia University,  
Montreal, Quebec, Canada, H3G 1M8.  
PhD Thesis, 2006.  
<https://arxiv.org/ftp/nlin/papers/0606/0606044.pdf>  
[Consultado 19/07/2018].

[22] . Uri Wilensky, Michael J. Jacobson. Complex Systems in Education: Scientific and  
Educational Importance and Implications for the Learning.  
THE JOURNAL OF THE LEARNING SCIENCES, 15(1), 11–34. 2006.  
<http://ccl.sesp.northwestern.edu/papers/jls-complex.pdf>  
[Consultado 02/08/2018].

[23] Costa Marques, Maria da Conceição da (2012). Contribución del modelo ABC en la  
toma de decisiones: el caso universidades. Cuadernos de Contabilidad, 13 (33), 527-  
543.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-14722012000200010](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-14722012000200010)  
[Consultado 02/08/2018].

[24] Luis R. Izquierdo. Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en  
agentes y mediante dinámica de sistemas.  
EMPIRIA. Revista de Metodología de Ciencias Sociales. No 16. pp. 85-112  
Universidad de Burgos. Julio-diciembre 2008.  
<http://revistas.uned.es/index.php/empiria/article/view/1391/1286>  
[Consultado 02/08/2018].

[25] Zaiyong Tang (Salem State College, USA), Xiaoyu Huang (University of Shanghai  
for Science & Technology, China, and Kallol Bagchi (University of Texas at El Paso,  
USA). Agent-Based Intelligent System Modeling. Artificial Intelligence Chapter 8 (pages  
51-57). 2009.  
<http://what-when-how.com/artificial-intelligence/agent-based-intelligent-system-modeling-artificial-intelligence/>  
[Consultado 02/08/2018].

[26] Adrià Molina. Apocalipsis Zombi: Comparación con la propagación de una  
enfermedad infecciosa. 2017. [Consultado 10/05/2018].



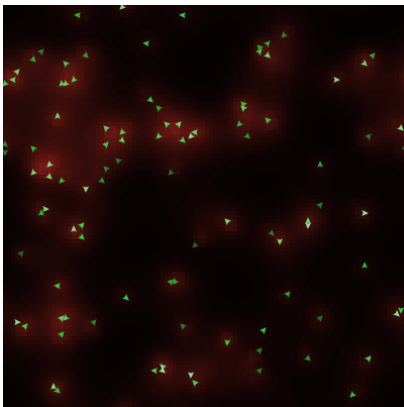
## ANNEXO 1. OTROS MODELOS BASADOS EN AGENTES VIVOS

Otros modelos basados en agentes vivos que también han sido analizados:

### HEATBUGS

Heatbugs es un modelo abstracto del comportamiento de agentes con inspiración biológica que intentan mantener una temperatura óptima a su alrededor. Demuestra como las reglas simples que definen el comportamiento de los agentes pueden producir diferentes tipos de comportamiento.

Los agentes, insectos, se mueven en una cuadrícula de “parches” cuadrados. Un agente puede moverse a un parche que ya tiene otro agente.



Cada agente tiene una temperatura “ideal”, la cual quiere alcanzar. Cuando mayor es la diferencia entre la temperatura del parche donde está el agente y la temperatura ideal del insecto, más “infeliz” es el insecto. Cuando un agente no es feliz este se mueve. Si está demasiado caliente, se mueve al parche vacío adyacente más cálido. Hay que tener en cuenta que estos insectos no son lo suficientemente inteligentes como para pasar siempre al mejor parche disponible.

Dependiendo de sus temperaturas ideales, algunos insectos tenderán a agruparse, mientras que otros tenderán a evitarse los unos a los otros, y otros revolotearán alrededor de los grupos.

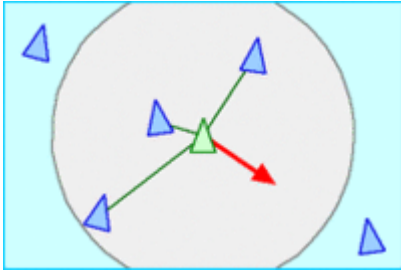
### BIDS

Este modelo simula el comportamiento de una bandada de pájaros, la palabra “boid” es una pronunciación del dialecto metropolitano de Nueva York para pájaro. La complejidad de este modelo surge de la interacción de agentes individuales (pájaros en este caso) que se adhieren a un conjunto de reglas simples. Las reglas más simples aplicadas en el “mundo de los pájaros” son las siguientes:

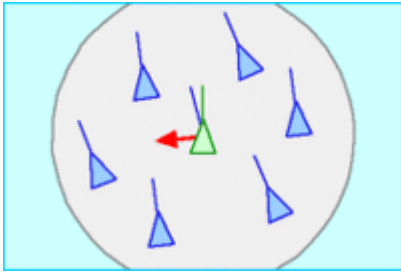
- Separación: Dirigir para evitar el hacinamiento de los compañeros de manada locales.

## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa

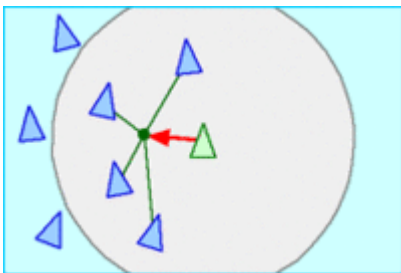
Edson Flores Rosales



- Alineación: Dirigir el rumbo promedio hacia el que se dirigen los compañeros de manada locales.

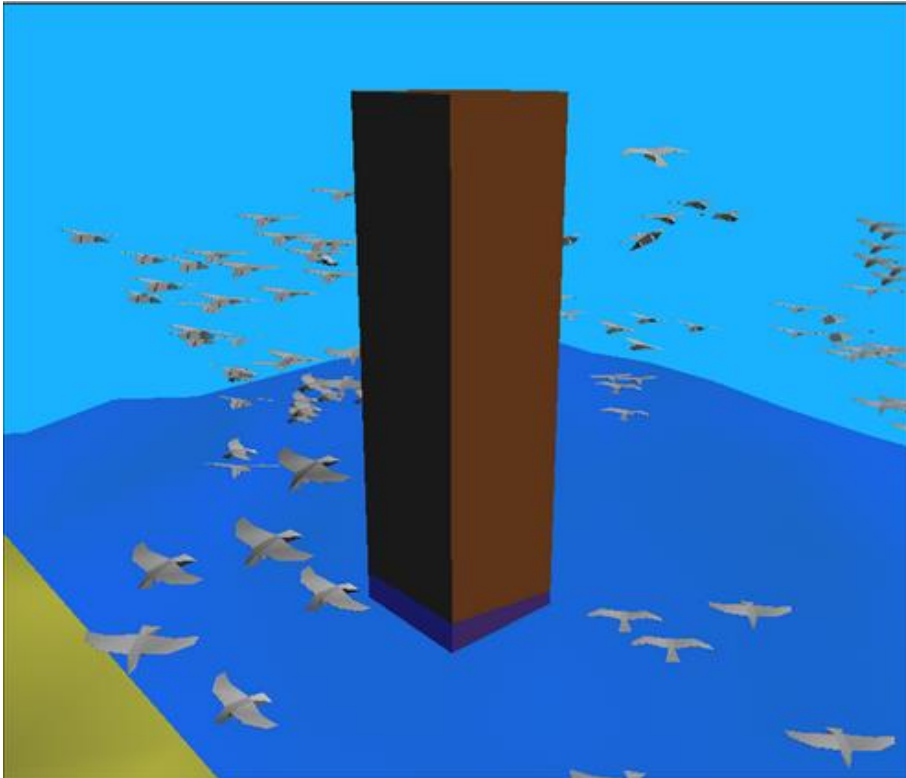


- Cohesión: Dirigir para avanzar hacia la posición promedio (centro de masa) de los compañeros de manada locales.



Se pueden agregar reglas más complejas, como la evitación de obstáculos y la búsqueda de objetivos.

El modelo básico se ha extendido de diferentes maneras desde que Reynolds lo propusiera. Por ejemplo, Delgado-Mata et al. amplió el modelo básico para incorporar los efectos del miedo o Hartman y Benes que introdujeron una fuerza complementaria a la alineación que llamaron el cambio de liderazgo, esta fuerza define la posibilidad de la manada cambien de líder y esta trate de escapar.



El movimiento de Boids se puede caracterizar como caótico (división de grupos y comportamiento salvaje) u ordenado. Comportamientos inesperados, como dividir bandadas y reunirse después de evitar obstáculos, puedes considerar emergentes, ya que del conjunto surgen resultados que no se esperarían de las partes por separado ya que sus características en principio no lo permitirían ("el todo es mayor que la suma de las partes").

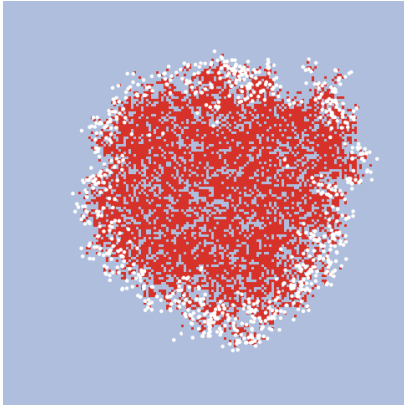
El marco boids se utiliza a menudo en gráficos por computadora, proporcionando representaciones de aspecto realista de bandadas de pájaros y otras criaturas, como bancos de peces o rebaños de animales. Fue utilizado, por ejemplo, en el videojuego de 1998 Half-Life para las criaturas voladoras que se ven al final del juego en Xen, llamado "boid" en los archivos del juego.

El modelo Boids se puede utilizar para el control directo y la estabilización de equipos de vehículos terrestres no tripulados (UGV) o vehículos aéreos micro (MAV) en la robótica de enjambres

## **MOUSETRAPS**

Este modelo propone la idea de un "gimnasio" lleno de ratoneras. Donde cada trampa para ratones es una pelota de ping pong. La idea es que cuando lanzas una sola bola de ping pong en medio de la habitación, la bola cae en una trampa, la trampa se dispara y una segunda bola vuela al aire. La primera bola también rebota en el aire nuevamente, por lo que hay dos bolas en el aire, cada una de esas bolas desencadena otra trampa, por lo que hay cuatro bolas en el aire y así sucesivamente.

Este experimento es una metáfora de la fisión nuclear. En la fisión nuclear, los átomos de material fisionable como el uranio son las "trampa para ratones", y los neutrones son las pelotas de ping pong.



Los cuadrados azules claros representan trampas para ratones no activadas. Los cuadrados rojos representan trampas para ratones activadas. Cuando una bola aterriza en un cuadrado azul claro, el cuadrado se vuelve rojo, aparece una nueva bola y ambas bolas recorren una distancia aleatoria en una dirección aleatoria.

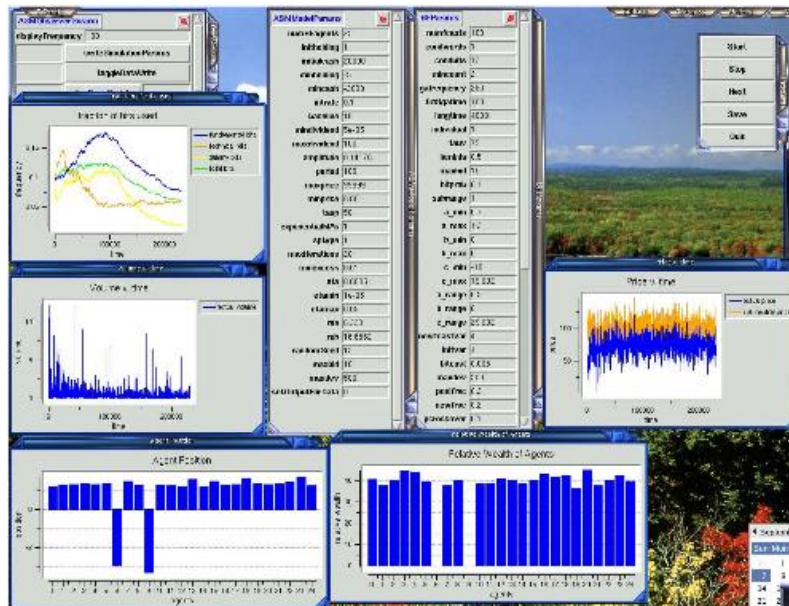
Extendiendo el modelo:

- Tanto una pelota lanzada como una bola que rebota viajan la misma distancia máxima, pero en realidad la trampa para ratones probablemente enviaría la bola lanzada mucho más lejos. Por lo que estas distancias diferentes se deberían tener controladas.
- Las bolas viajan a sus nuevas posiciones de forma instantánea, en realidad deberían tomar un tiempo proporcional a la distancia recorrida, factor que también se tendría que tener controlado.

## **SANTA FE ARTIFICIAL MARKET**

Santa Fe Artificial Market fue desarrollada por el instituto Santa Fe y es uno de los primeros ejemplos de sistemas adaptativos artificiales complejos. Simula una bolsa de valores con un modelo basado en agentes, esto significa que trata de imitar el hecho real donde un gran número de operadores se sientan y comercian entre ellos. Diferentes operadores pueden usar diferentes estrategias, esta estrategia pueden modificarse durante la simulación. Las estrategias menos adecuadas no sobreviven, son evadidas por estrategias más exitosas.

## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa Edson Flores Rosales



## -IMPLEMENTACIONES ABM

### SWARM



Swarm es un framework de simulación de modelado basado en agentes de código abierto, útil para simular la interacción de agentes (sociales o biológicos) y su comportamiento colectivo emergente. Swarm se desarrolló inicialmente en el Instituto Santa Fe a mediados de la década de 1990, su uso está cubierto por la Licencia pública general de GNU.

Escrito en Objective-C y Java puede correr en sistemas operativos Unix y/o Windows.

-Aplicaciones:

- Aplicaciones científicas

El modelo basado en agentes busca replicar estas complejidades y adaptaciones en entornos computacionales donde estos comportamientos interactivos emergentes se pueden analizar de forma multidimensional. Al definir y asignar agencias que reflejan los comportamiento prescritos, conocidos o estimados, a los agentes de software activos en una simulación por ordenador, los científicos pueden aproximar los resultados

## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa

Edson Flores Rosales

experimentales que no son posibles en los marcos temporales naturales.

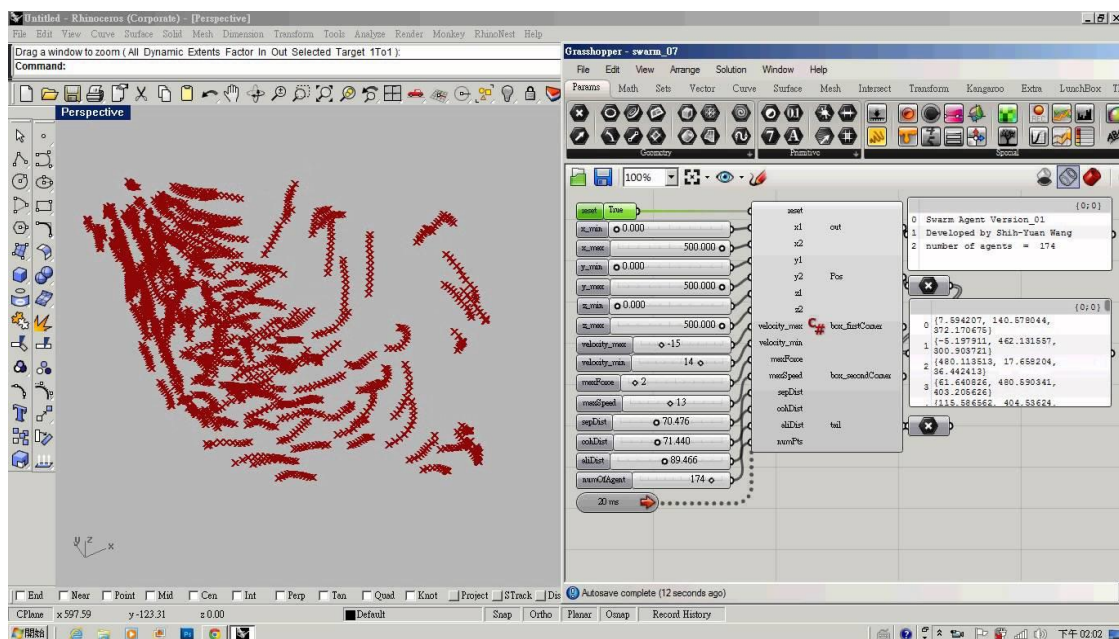
Swarm es una plataforma que brinda a los científicos la oportunidad de realizar y visualizar experimentos en estos macroambientes y microambientes sintéticos para probar teorías científicas, conjuntos de datos naturales y otros análisis sin restricciones de tiempo, volumen, peligros o muchos otros parámetros.

- Aplicaciones comerciales

Los modelos basados en agentes se han utilizado desde mediados de la década de 1990 para resolver una variedad de problemas comerciales y tecnológicos. Ejemplos de aplicaciones incluyen:

- Optimización y logística de la cadena de suministro.
- Modelización del comportamiento del consumidor, incluyendo el boca a boca y los efectos de las redes sociales.
- Computación distribuida.
- Gestión de la fuerza de trabajo.
- Gestión del tráfico.
- Gestión de cartera.

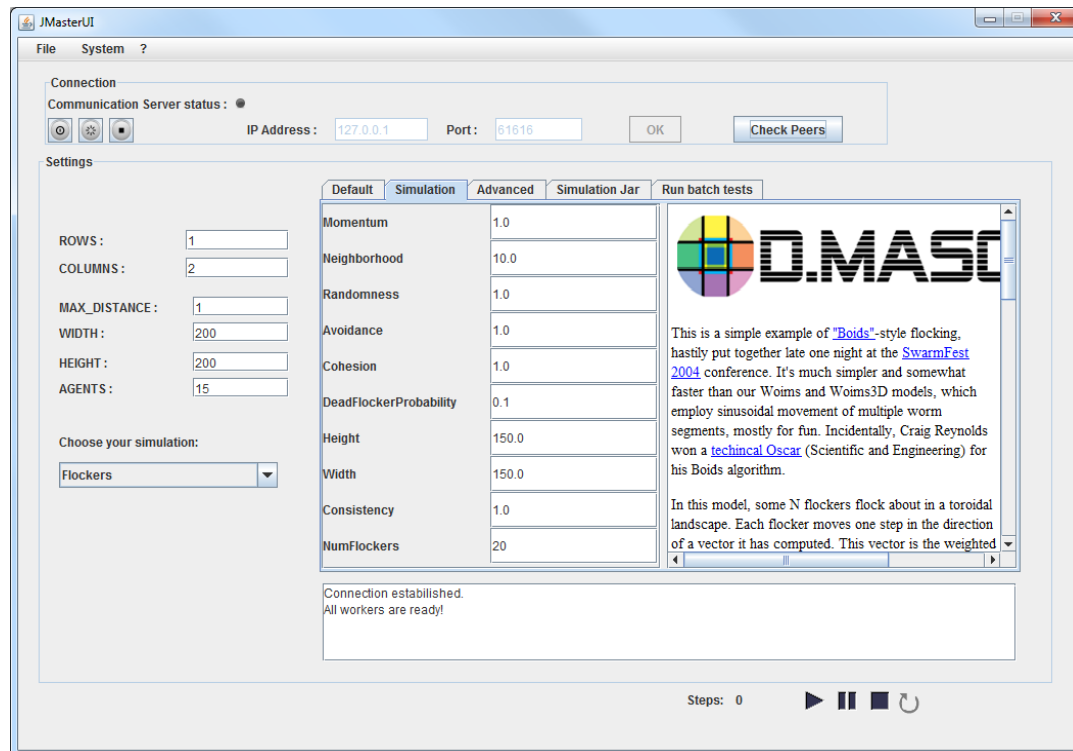
En estas y otras aplicaciones, el sistema de interés se simula capturan el comportamiento de los agentes individuales y sus interconexiones. Swarm se puede usar para probar cómo los cambios en los comportamientos individuales afectan en el comportamiento general del sistema emergente.



## MASON

MASON es un entorno de simulación de agentes múltiples desarrollado en Java. Fue desarrollado en el Laboratorio de Computación Evolutiva de la Universidad de George Mason junto con el Centro de Complejidad Social de GMU. Lanzado por primera vez en 2003, el entorno está en continuo desarrollo y se mantiene actualizado.

El desarrollo de MASON comenzó dentro del entorno Java.net pero actualmente está en GitHub. MASON se puede usar con el entorno de desarrollo integrado en Eclipse, tiene una licencia Academia Free License.



Es un entorno que guarda similitud con Repast que seguidamente analizaremos.

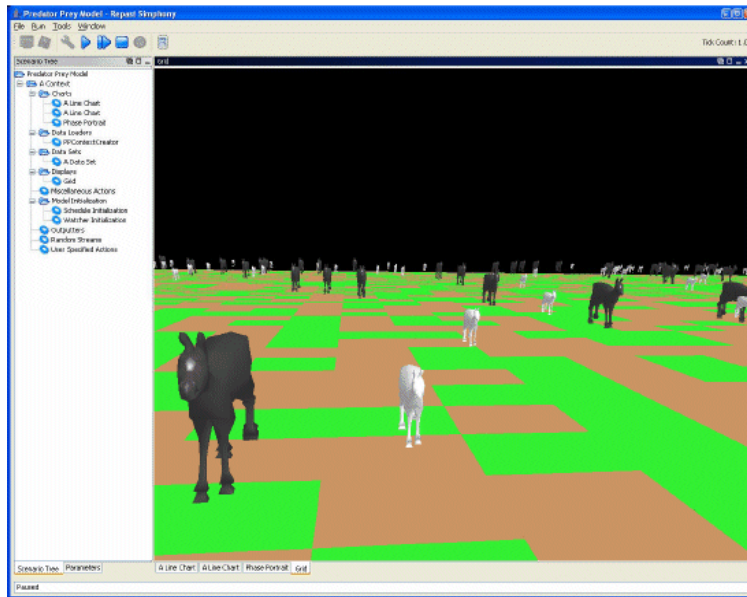
## REPAST

Es una herramienta de modelado y simulación ampliamente utilizada, gratuita y de código abierto, multiplataforma, basada en agentes. Repast tiene características adaptativas incorporadas, como algoritmos genéticos y regresión, fue desarrollado en la Universidad de Chicago.



## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa

Edson Flores Rosales



### Características:

- Variedad de agentes y ejemplos
- Totalmente orientado a objetos
- Programador de eventos discretos completamente concurrente
- Herramientas integradas de registros y graficación de resultados de simulación
- Permite a los usuarios acceder dinámicamente y modificar agentes y modelos en tiempo de ejecución.
- Bibliotecas de algoritmos genéticos, redes neuronales, etc.
- Modelado de dinámica de sistemas incorporados
- Herramientas de modelado de redes sociales
- Soporte integrado de sistemas de información geográfica (GIS)
- Esta implementado en Java, C#, etc.
- Admite Java, C#, Visual Basic, Python, etc.
- Esta disponible en la mayoría de plataformas informáticas

### ASCAPE

Ascape es una herramienta innovadora para desarrollar y explorar modelos basados en agentes de uso general. Está diseñado para ser flexible y poderoso, pero también accesible, fácil de usar y expresivo. Los modelos se pueden desarrollar en Ascape usando mucho menos código que en otras herramientas.

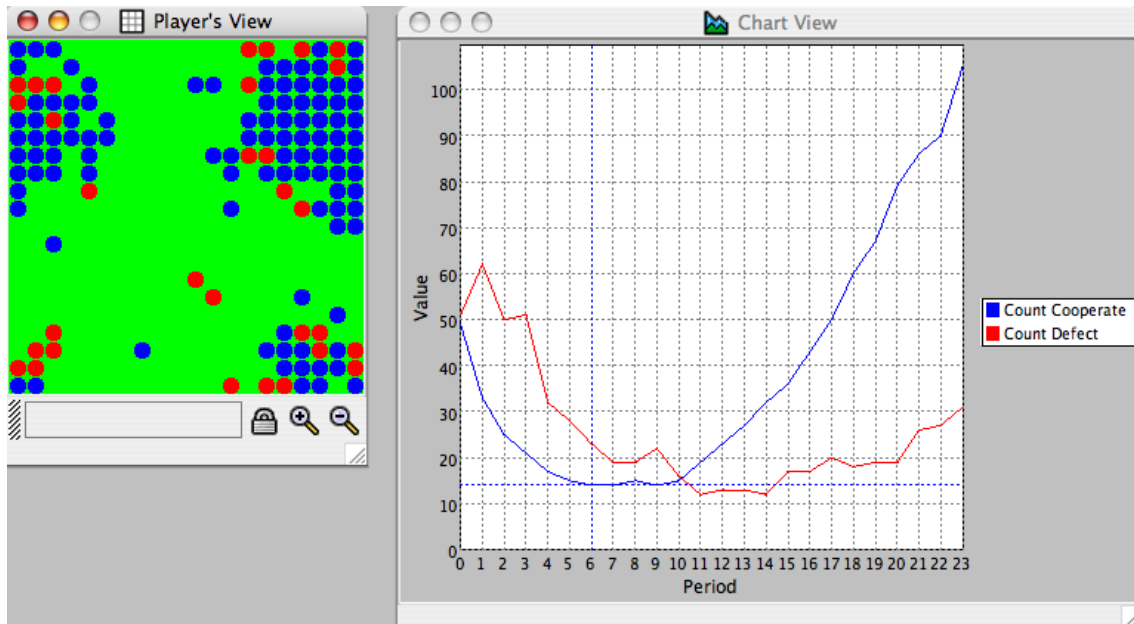


## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa

Edson Flores Rosales

Un marco de alto nivel admite el diseño de un modelo complejo, mientras que las herramientas del usuario final hacen posible que los no programadores exploren muchos aspectos de la dinámica del modelo. Ascape está escrito completamente en Java, y puede ejecutarse en cualquier plataforma habilitada para Java.

Ascape se encuentra bajo licencia BSD de código abierto estándar y, por lo tanto, es de uso y redistribución gratuita.



## ANNEXO 2. CÓDIGO SIMULADOR Y MANUAL DE USUARIO

A continuación, presentamos el código del simulador usado en el trabajo además de un manual de usuario del mismo.

### CÓDIGO SIMULADOR

```
breed [humano]
breed [zombi]
breed [armado]
breed [arma]
breed [bala]
breed [muerto]

globals [
  total-humano
  total-zombi
  total-armado
]

turtles-own [
  velocidad
  zombi_visto
  humano_visto
  armado_visto
  presa
  presa_cerca
  zombi_cerca
  volver_comprobar
  volver_comprobar_muro
  comprobar_punteria
  energia
]

to building-draw
  if mouse-down?
  [
    ask patch mouse-xcor mouse-ycor
    [ set pcolor yellow ]
  ]
end

to Setup
  pop-check
  setup-agents
  update-globals
  do-plots
end

to go ;;Run the simulation.
  reset-ticks
  scared-check
  repeat Velocidad-Humano [ ask humano [ fd 0.2 ] display ]
  repeat Velocidad-Zombi [ ask zombi [ fd 0.2 ] display ]
```

Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa  
Edson Flores Rosales

```
repeat Velocidad-Humano [ ask armado [ fd 0.2 ] display ]  
repeat Velocidad-Humano + 1 [ ask bala [ fd 0.2 ] display ]  
update-globals  
do-plots  
tick  
end
```

```
to setup-agents  
set-default-shape zombi "person"  
set-default-shape humano "person"  
set-default-shape arma "gun"  
set-default-shape armado "redneck"  
set-default-shape bala "dot"  
set-default-shape muerto "caterpillar"
```

```
ask n-of Zombis-Iniciales patches with [pcolor = black]  
[ sprout-zombi 1  
[ set color red ] ]
```

```
ask n-of Humanos-Iniciales patches with [pcolor = black]  
[ sprout-humano 1  
[ set color blue ] ]
```

```
ask n-of arma-recogida patches with [pcolor = black]  
[ sprout-arma 1  
[ set color orange ] ]  
end
```

```
to scared-check  
ask humano [  
if any? other turtles-here with [color = orange]  
[lock-n-load]  
zombis_cerca  
ifelse any? zombi_visto  
[escapar]  
[moveverse]  
]
```

```
ask armado [  
zombis_cerca ;;zombis-near  
ifelse any? zombi_visto ;;scared  
[defenderse]  
[moveverse]  
]
```

```
ask zombi [  
if any? other turtles-here with [color = blue]  
[convertir]  
if any? other turtles-here with [color = green]  
[convertir]  
buscar-presa  
ifelse any? presa  
[run-toward]  
[moveverse]
```

```
]

ask bala [
  if [pcolor] of patch-ahead 1 != black
  [die]
  if energia < 14
  [
    if any? other turtles-here with [color = red]
    [matar]
    if any? other turtles-here with [color = blue]
    [matar]
    if any? other turtles-here with [color = green]
    [matar]
  ]
  set energia energia - 1
  if energia = 0
  [die]
]
end

to move
  set volver_comprobar random 20
  if volver_comprobar > 15
  [girar-derecha]
  if volver_comprobar < 5
  [girar-izquierda]
  if [pcolor] of patch-ahead 1 != black
  [muro]
  ask zombi [
    if any? other turtles-here
    [ convertir ]
  ]
end

to muro
  set volver_comprobar_muro random 10
  if volver_comprobar_muro >= 6
  [muro-girar-derecha]
  if volver_comprobar_muro <= 5
  [muro-girar-izquierda]
end

to muro-girar-derecha
  rt 150
end

to muro-girar-izquierda
  lt 150
end

to girar-derecha
  rt random-float 10
end

to girar-izquierda
  lt random-float 10
```

end

to convertir

ask humano-on patch-here[set breed zombi]

ask armado-on patch-here[set breed zombi]

ask zombi-on patch-here [set color red]

end

to zombis\_cerca

set zombi\_visto zombi in-radius Vision-Humano

end

to escapar

set zombi\_cerca min-one-of zombi\_visto [distance myself]

face zombi\_cerca

rt 180

if [pcolor] of patch-ahead 1 != black

[muro]

end

to buscar-presa

set humano\_visto humano in-radius Vision-Zombi

set armado\_visto armado in-radius Vision-Zombi

set presa (turtle-set humano\_visto armado\_visto)

end

to run-toward

set presa\_cerca min-one-of presa [distance myself]

face presa\_cerca

if any? other turtles-here

[convertir]

if [pcolor] of patch-ahead 1 != black

[muro]

end

to lock-n-load

ask humano-on patch-here[set breed armado]

ask armado-on patch-here [set color green]

end

to defenderse

set zombi\_cerca min-one-of zombi\_visto [distance myself]

face zombi\_cerca

disparo

rt 180

if [pcolor] of patch-ahead 1 != black

[muro]

end

to disparo

set comprobar\_punteria random 100

if comprobar\_punteria < punteria

[

hatch-bala 1

[

Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa  
Edson Flores Rosales

```
        set size .5
        set color white
        set energia 15
    ]
]
end

to matar
    ask zombi-on patch-here
    [
        set breed muerto
        set color white
    ]
    ask humano-on patch-here
    [
        set breed muerto
        set color pink
    ]
    ask armado-on patch-here
    [
        set breed muerto
        set color green
    ]

    die
end

to update-globals
    set total-humano (count humano)
    set total-zombi (count zombi)
    set total-armado (count armado)
end

to do-plots
    set-current-plot "Gráfica"
    set-current-plot-pen "Humano"
    plot total-humano
    set-current-plot-pen "Zombi"
    plot total-zombi
    set-current-plot-pen "Armado"
    plot total-armado

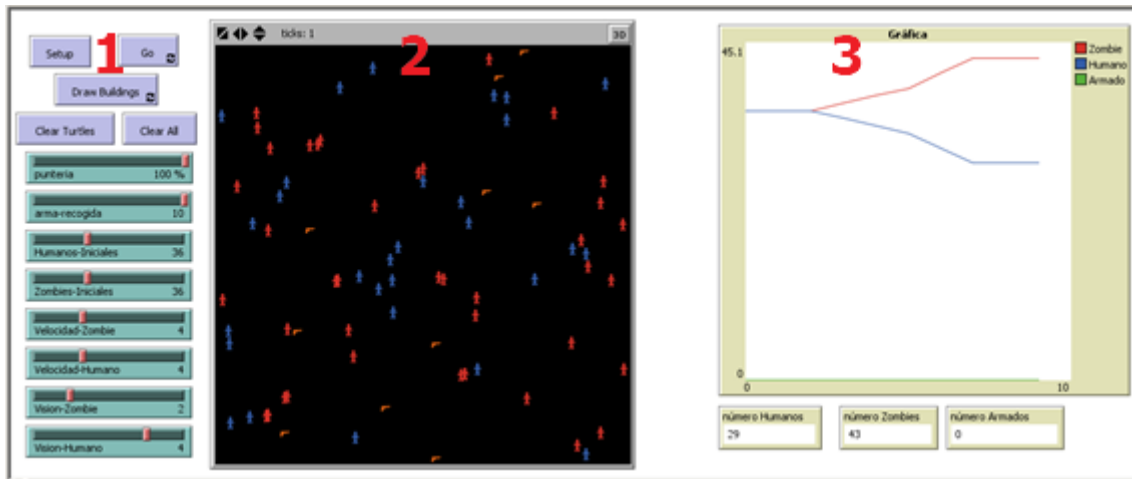
end

to pop-check
    if Zombis-Iniciales + Humanos-Iniciales > count patches
        [ user-message (word "Ciudad Zombi " count patches " agentes.")
          stop ]
end
```

## MANUAL DE USUARIO SIMULADOR

A continuación, explicaremos como usar el simulador para realizar pruebas con diferentes parámetros que el propio usuario puede elegir.

La pantalla inicial que muestra es el siguiente, está dividida en tres zonas:



Zona 1: Aquí podemos ver la botonera, que el usuario puede utilizar según vea conveniente

- **SETUP:** Inicia los agentes con los parámetros indicados.
- **GO:** Inicia la simulación.
- **Clear Turtles:** Limpia todos los agentes.
- **Clear All:** Limpia todo, agentes y gráficos.
- **Draw Buildings:** Pinta paredes, estas paredes interactúan con los Zombis y humanos.

Debajo de la botonera podemos definir los parámetros de simulación:

-**Puntería:** En el caso de los Agentes o Humanos Armados será una variable que determinará la puntería en el momento de disparar a un Zombi y derrotarlo.

-**Arma-Recogida:** Es la cantidad de armas que los humanos tendrán disponible en un determinado momento, una vez recojan esta arma pasarán a ser Humanos-Armados.

-**Velocidad Zombi:** Velocidad de desplazamiento que dispone los Zombi para “cazar” a los humanos.

-**Velocidad Humano:** Velocidad de desplazamiento de disponen los Humanos o Agentes armados.

-**Visión Zombi:** Capacidad de un Zombi de detectar un Humano o Humano Armado cerca, a mayor capacidad de visión mayor capacidad de “caza”.

-**Visión Humano:** Capacidad de un Humano de detectar a un Zombi cerca.

## Zona 2:

En esta zona podemos ver el estado inicial de simulación, estado intermedio en tiempo real mientras se lleva acabo de la simulación y esta final una vez finalizada la simulación.

## Zona 3:

En esta zona podemos ver el gráfico resultante, durante la simulación podemos ver la evolución del gráfico hasta llegar al final, aquí observamos como varían el número de los distintos agentes, estos también están identificados por colores en la zona 2, son los siguientes:

**-Zombis (Rojo):** Persona infectados por el virus Zombi.

**-Humanos (Azul):** Personas no infectadas por el virus Zombi, pero que puede ser infectados por un Zombi en caso de ataque.

**-Humanos Armados (Verde):** Personas no infectadas por el virus Zombi, pero que en caso de ataque de un Zombi tiene más probabilidades de derrotar a uno.

## Iniciar Simulación paso a paso

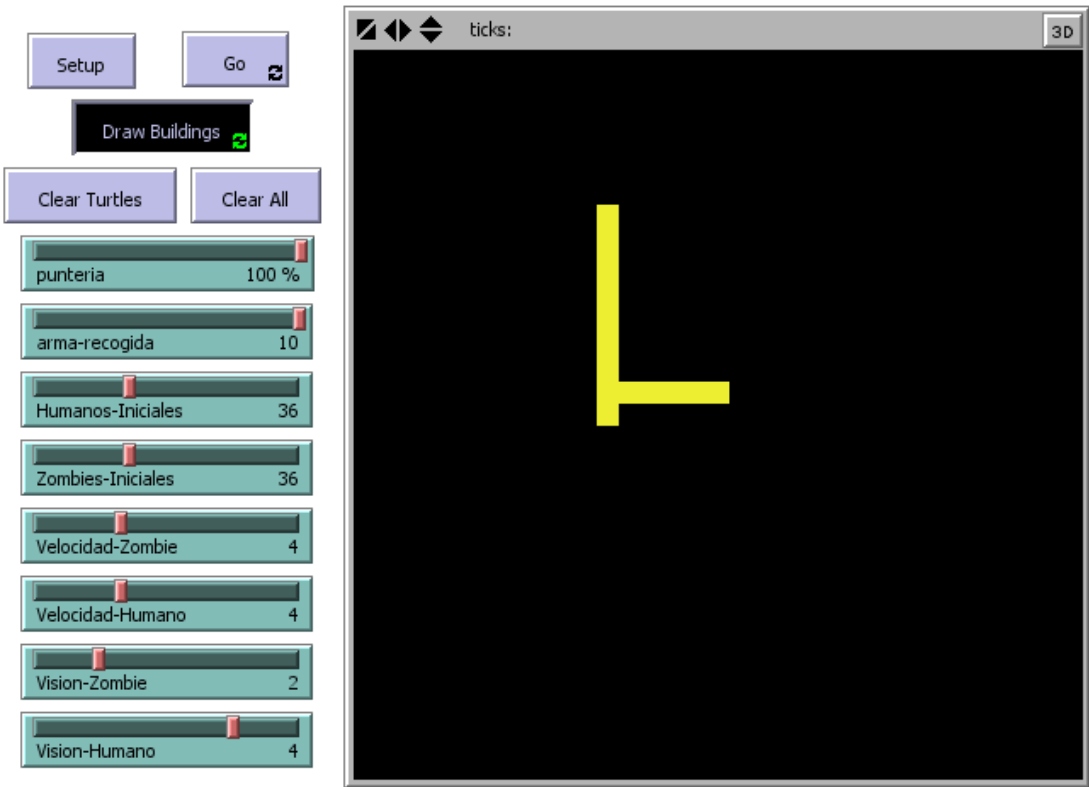
**Paso 1:** Definiremos los parámetros con los que deseamos realizar la simulación, es sencillo, se marca en los marcadores lineales:



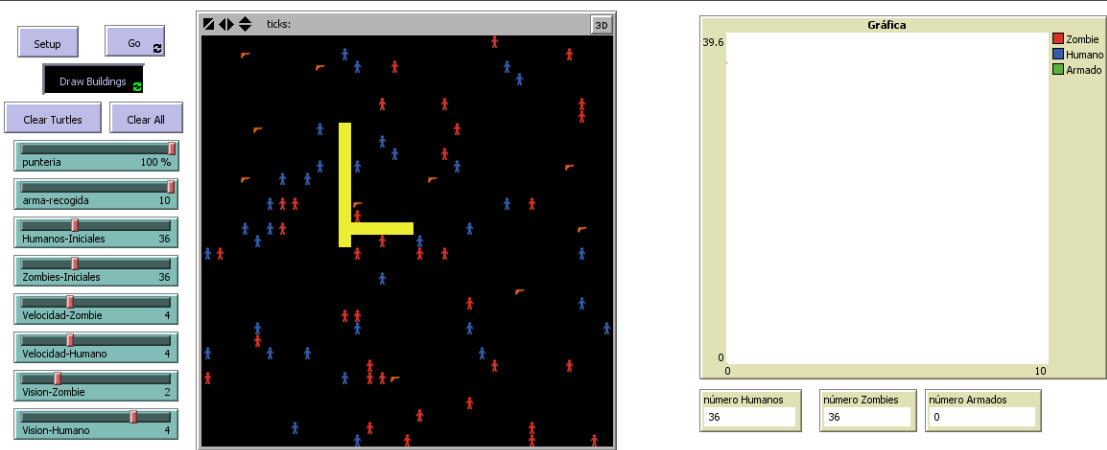
**Paso 2:** Si deseamos podemos dibujar paredes para una simulación más realista, haciendo click en DRAW BUILDINGS, el cursor hará de pincel sobre la zona 2 que nos permitirá pintar paredes.



Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa  
Edson Flores Rosales



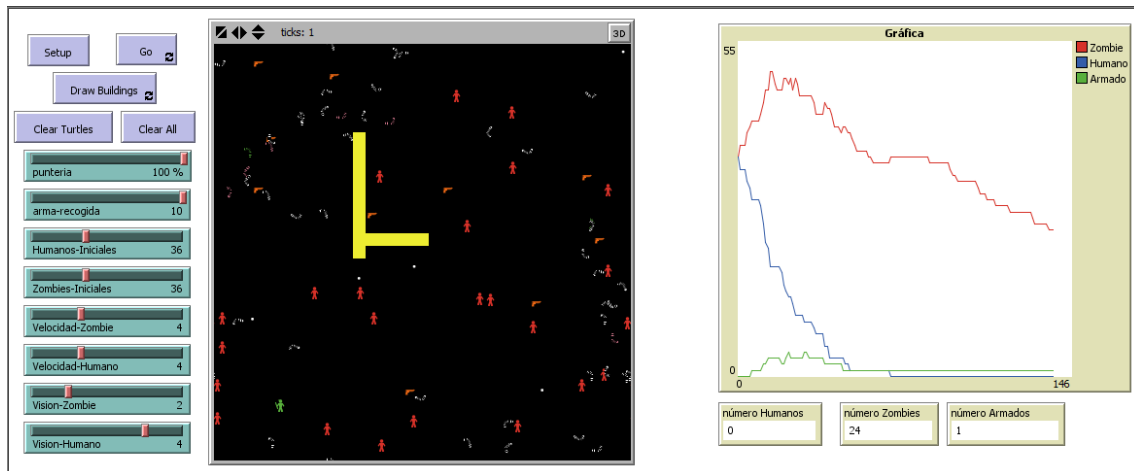
**Paso 3:** En la botonera, hacemos click en el botón de SETUP, que establecerá el estado inicial de la simulación.



## Apocalipsis Zombi: Comparación con una enfermedad infecciosa

Edson Flores Rosales

**Paso 4:** Una vez tengamos el estado inicial definido, tenemos que hacer click en el botón GO.



**Paso 5:** Durante la simulación podemos detener la misma, con el botón STOP, una vez detenida la simulación podemos reiniciarla e iniciar otra con diferentes o los mismos parámetros haciendo click en CLEAR ALL.

